

中国省际粮食贸易碳转移空间格局及其责任分担

杨青林¹, 赵荣钦^{1*}, 罗慧丽¹, 朱瑞明², 肖连刚¹, 谢志祥¹, 孙 锦¹

(1. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046; 2. 河南大学地理与环境学院, 开封 475001)

摘 要: 开展省域尺度粮食贸易碳转移空间格局及其责任分担研究, 对于合理划分碳减排责任、探索面向粮食安全的省际协同碳减排策略具有重要现实意义。该研究采用 2020 年中国 31 个省级行政区截面数据, 基于粮食贸易线性规划方法和粮食贸易碳排放量计算模型对省际粮食贸易及其碳排放进行了核算, 并揭示了其空间转移格局; 采用粮食贸易碳排放量责任分担计算方法探讨了各省份粮食贸易碳排放责任分布特征。结果表明: 1) 在省际粮食贸易与粮食贸易碳排放格局中, 输出区主要为东北、华北、西北和华中地区, 输入区主要为西南、华南和华东地区。2020 年全国粮食贸易总量为 1.53 亿 t, 输出区中东北地区累计向外输送 7 126.54 万 t, 占贸易总量的 46.7%, 华北地区累计向外输送 2 617.38 万 t, 占贸易总量的 17.1%, 西北地区累计向外输送 455.51 万 t, 占贸易总量的 3.0%, 华中地区累计向外输送 5 069.71 万 t, 占贸易总量的 33.2%; 2) 粮食贸易碳排放空间上呈现出“北碳南输、中碳西输”的流向格局, 粮食贸易碳排放呈现“南-北”大、“东-西”小的流量特征。河北、山西、内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、甘肃、宁夏、新疆是全国粮食碳排放输出区, 南北方向粮食贸易碳排放流量共计 9 119.82 万 t, 东西方向粮食贸易碳排放流量共计 2 229.49 万 t; 3) 粮食贸易碳排放转移过程中输入区较输出区而言应承担的碳减排责任更大, 经济发达省份的责任占比较大, 而经济规模较小的省份责任也相对较小。输出区分担碳减排比例平均为 29.5%, 输入区分担比例平均为 70.5%; 4) 共担原则下输出区中安徽、黑龙江、吉林、江西、内蒙古、山西和新疆的分担比例较低, 甘肃、河北、河南、湖北、湖南和宁夏的分担比例较高, 受帮扶效应影响, 经济发达省份对经济欠发达省份的帮扶较多, 会承担较多减排责任。总体而言, 基于共同责任分担原则, 不仅有利于控制输出区、输入区的碳排放, 而且对于稳固粮食主产区产量有积极作用, 为此该研究针对性地提出保障区域粮食安全、公平合理分配区域间碳减排责任优化策略, 以实现农业领域“双碳”战略与粮食安全双赢目标。

关键词: 粮食; 碳排放; 排放控制; 碳转移; 空间格局; 共担责任

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.001

中图分类号: S162.5⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-16-0001-10

杨青林, 赵荣钦, 罗慧丽, 等. 中国省际粮食贸易碳转移空间格局及其责任分担[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 1-10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.001 <http://www.tcsae.org>

Yang Qinglin, Zhao Rongqin, Luo Huili, et al. Spatial pattern and responsibility sharing of carbon transfer in China's inter-provincial grain trade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 1-10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.16.001 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

探索面向粮食安全的省际协同碳减排, 是实现“双碳”战略与粮食安全双赢重要路径。粮食、能源是实现社会经济可持续发展的重要物质和基础^[1-2], 受快速城市化、不可持续的资源消耗、人口增长和气候变化等影响, 粮食和能源安全面临着威胁^[3], Burrows^[4]预测到 2030 年, 人类社会经济活动对粮食、能源的需求较 2012 年将分别增加 35%和 50%。农业是全球重要的温室气体排放源^[5], Vermeulen 等^[6]的研究发现全球 19%~29%的温室气体排放来自于粮食生产系统。就中国的情况而言, 耕地资源、淡水资源分别不足全球的 9%和 6%, 却保障了占世界 20%

人口的粮食需求^[7]。较长一段时间内粮食产量增加主要依靠大量的水、能、物资等投入, 由此产生了巨量的农业碳排放, 导致农业生态环境持续恶化, 直接威胁到中国的粮食安全^[8], 为此中国政府庄严承诺“2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和”^[9]。在推进农业领域碳达峰、碳中和过程中, 首要任务还是要先确保粮食安全, 在确保粮食安全的同时积极助力“双碳”目标实现。农业领域“双碳”目标的实现, 一方面需要“减排”与“增汇”双管齐下^[10], 但同时还应考虑到各个区域的减排责任, 只有多措并举才能尽早实现粮食安全和农业领域“双碳”目标双赢。

粮食具有流通性, 粮食流通也隐含了虚拟水土资源和碳排放转移。近几年, 粮食贸易过程中的隐含碳排放区域转移越来越受到国内外学者的关注^[11]。由于不同区域水土资源组合特征和开发强度具有明显的差异^[12], 粮食生产过程水能资源消耗和物资投入强度也存在差异, 粮食贸易不仅涉及虚拟水土资源转移, 由于粮食生产地和消费地的分离也附带了碳排放转移, 粮食生产端碳排

收稿日期: 2022-06-25 修订日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971241); 河南省高校科技创新人才(人文社科类)项目(2021-CX-011); 河南省留学人员科研择优资助项目

作者简介: 杨青林, 研究方向为土地利用与碳排放。

Email: yangedu@foxmail.com

*通信作者: 赵荣钦, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境与碳排放。Email: zhaorq234@163.com

放大部分是为满足其他地区的需求而产生^[13], 因此碳排放净流出地区承担了较大的减排压力^[14]。开展省际粮食贸易碳转移研究, 有助于识别并划分碳减排责任, 对于探索创新基于共同责任的省际碳转移减排策略制定有重要的参考意义。

近年来, 国内外学者从不同角度探讨了粮食贸易、虚拟资源流动和碳转移问题。在粮食贸易方面, 主要侧重于网络空间格局^[15]、网络格局影响因素^[16]、结构安全性^[17]、粮食运输路径与成本^[18]等研究。水、土资源是粮食生产的基础, 粮食贸易过程中附着虚拟水和虚拟耕地等资源流动, 以粮食贸易为载体的虚拟资源流动研究日趋增多。Zhang 等^[19]的研究表明, 中国农产品虚拟水贸易处于贸易顺差状态, 进口虚拟水远大于出口, 且呈不断上升趋势。Fu 等^[20]认为中国不同地区气候条件差异导致作物生长过程中的耗水量存在较大差异, 通过粮食贸易纽带实现虚拟水转移, 中国“北粮南运”的粮食贸易格局可能会加剧北方地区水资源短缺。在虚拟耕地方面, 主要侧重于虚拟耕地的进出口核算^[21]、影响因素^[22]及区域间流动格局分析^[23]。受全球气候变化影响, 地区间碳减排责任的博弈日益激烈, 国内外学者对区域碳排放转移开展了较多的研究, 主要集中于碳排放转移量核算^[24]、区际贸易隐含碳转移^[25]、省际贸易碳排放转移^[26]、碳排放转移网络结构和传导路径^[27]、碳排放转移驱动因素研究^[28], 研究方法多以投入产出法为主, 且研究对象主要针对区际贸易, 鲜有针对初级产品隐含碳转移的研究。在碳减排责任方面, 碳减排正逐渐成为各个国家、地区、产业部门的主要任务之一, 只有明确了碳减排责任才能实现区域协同高效减排^[29]。碳减排责任划定主要有三种, 分别是生产者责任、消费者责任和共担责任。生产者责任认为应将碳排放责任全部归于生产者, 此种方法计算较为方便, 但是忽略了碳排放转移过程中“碳泄露”问题^[30]。消费者责任认为碳排放责任应该全部归属于消费该产品的主体, 此种方法考虑到了碳减排的公平性, 但是将减排责任全部归于消费者, 缺乏对碳排放生产者的必要约束, 致使产品贸易过程隐含的碳排放较高^[31]。随着生产者责任和消费者责任弊端的出现, 共担责任开始受到国内外学者广泛关注, 共担责任原则认为碳减排责任应该由生产者和消费者共同承担^[32], 共担责任原则下可有效缓解生产者与消费者因产品贸易而产生的减排压力, 同时对区域协同减排政策的制定有实际的参考意义。

以上研究为进一步深入开展中国省际粮食贸易碳转移空间格局研究及其责任分担提供了重要思路和方法参考, 但仍需在以下方面进一步加强: 1) 粮食贸易是缓解区域水土资源要素错配的重要手段^[33], 粮食贸易过程不仅附带虚拟水土资源转移, 同时还应注意到其过程附带的隐含碳排放转移。2) 在研究对象方面, 较多倾向于国际或省际间贸易所带来的虚拟资源流动, 缺乏针对中国区域粮食交易所致的碳转移研究, 易导致地区间粮食输出区与输入区责任不明确, 不利于区域间协同减排。3) 在研究方法层面, 由于区域间粮食交易数据获取难度较大^[34], 一般采用多区域投入产出模型计算^[35], 虽然该方法能够

很好地反映出多个经济体或部门间的关联关系, 但粮食作为一种初级产品, 目前学界内关于粮食价值型和实物型省际贸易流矩阵建立方法尚未统一。其次, 因为国家投入产出表为每五年编制一次, 最新的投入产出表也只更新到了 2017 年, 考虑到投入产出模型的时效性和局限性, 所以采用线性规划模型。粮食贸易不仅是实现各地区粮食供需平衡, 其内在具有趋利性, 即追求粮食贸易过程中运输成本最小化, 因此运粮成本是影响粮食贸易的主要驱动因素, 基于粮食运输成本最小化线性规划模型从驱动因素的角度量化了粮食贸易, 排除了贸易数据的局限性, 为粮食贸易过程碳排放转移研究提供一种新的、可行的参考, 基于运粮成本最小化线性规划模型已被国内外多位学者证实^[36]。在协同减排和省际碳公平背景下, 研究区域间粮食贸易碳转移空间格局特征及其碳减排责任分担, 对于探索针对性的省际碳转移减排机制制定具有重要现实意义。鉴于此, 该研究利用粮食贸易线性规划方法和省际粮食贸易碳排放量计算模型, 采用 2020 年中国 31 个省级行政区(港、澳、台除外)截面数据, 模拟省际间粮食贸易及碳排放转移情况, 并分析省域尺度粮食贸易碳转移空间格局, 最后利用粮食贸易碳排放量责任分担计算方法, 探讨共同责任原则下各省份的粮食贸易碳排放减排责任, 以期缺乏粮食贸易数据的地区量化碳排放转移提供方法参考, 为区域协同减排政策的制定提供借鉴。

1 研究方法与数据来源

1.1 理论框架

粮食生产和消费具有鲜明的地域性特征, 这是自然条件、资源禀赋和经济社会诸多因素共同作用的结果。粮食生产主要受自然资源禀赋、耕地面积、农业技术、经济发展水平、生产条件等内部因素和粮食政策、粮食贸易市场等外部因素共同影响; 粮食消费主要受粮食生产结构、饮食习惯、人口规模、经济发展水平等因素影响(图 1)。区域之间自然条件、种植结构和消费需求等的差异从根本上决定了区际粮食贸易的路径、种类和规模。

粮食贸易通过地域分工和区际流通解决了生产和消费之间的矛盾, 但从跨区域环境影响的视角而言, 粮食贸易也隐含了农业生产过程中水土资源和碳排放转移, 以及农业投入带来的异地环境影响。其中, 作为农业生产过程中物资投入和能源消耗的综合表征, 隐含碳排放转移是粮食生产异地环境影响的重要指标, 能够为基于粮食贸易的区际环境责任分担提供依据。因此, 粮食贸易碳减排应是生产者和消费者的共同责任, 若对生产者划分碳减排责任比例过高, 其将面临着粮食生产和碳减排的双重压力, 不利于调动粮食生产者的积极性。若对消费者划分碳减排责任比例过高, 则粮食输入地将会增加更多的成本, 进而影响到区域粮食安全。而基于共担原则的下碳减排责任划分, 可以有效缓解粮食生产地与输入地因粮食贸易而产生的减排压力, 同时也为区域间协同减排提供减排路径参考。正是基于以上考虑, 该研究尝试通过隐含碳流识别粮食输出区和输入区的环境

责任,探索基于共同责任的省际碳转移减排机制,为推动粮食安全和碳减排双重目标的实现提供参考借鉴。

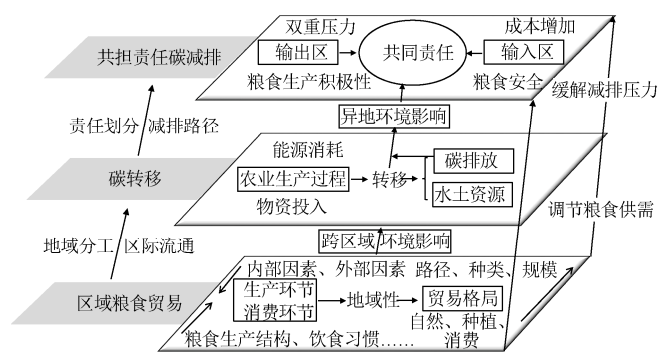


图 1 粮食贸易碳转移及其责任分担的理论框架

Fig.1 Theoretical framework of carbon transfer and responsibility sharing in grain trade

1.2 数据来源及处理

国内和国际关于粮食的定义有所不同,国际上一般认为粮食包括玉米、小麦、稻米和杂粮^[37],而根据中国粮食的统计则包括了稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类,用途则包括了口粮、工业用粮、饲料用粮、种子用粮和粮食损耗。根据研究目标,采用 2020 年中国 31 个省级行政区截面数据(港、澳、台数据暂缺),研究中国省级粮食交易量及碳转移情况。研究数据主要包括以下两个方面:1) 粮食供需计算所需数据。根据肖玉等^[38]的粮食供需计算方法,采用粮食生产量、人均消费量估算各省区粮食需求量和粮食自给率。粮食生产量、城镇和农村年末人口数、不同年龄段人口数量、粮食作物播种面积、肉蛋奶水产量数据来自《中国统计年鉴 2021》,人均口粮摄入量参考《中国居民平衡膳食指南 2016》,单位面积用种量来自《全国农产品成本收益资料汇编》,工业用粮数据来自《中国食品工业年鉴》。2) 粮食贸易线性规划数据。参考高守杰等^[18]的方法,在 ArcGIS 中获取最低成本的 OD 成本矩阵,在此基础上进行粮食贸易最优路径分析。全国 1:100 万公众版基础地理信息数据(2021)来自国家基础地理信息中心,从数据库中提取全国铁路网矢量数据,在 ArcGIS 平台计算不同省会城市的铁路运输距离。粮食的铁路运输费用参考《铁路货物运价规则》。

1.3 研究方法

1.3.1 基于线性规划的粮食贸易计算方法

鉴于各省份间粮食交易数据难以获取,因此采用线性规划法模拟各省粮食交易量。该研究暂不考虑国际粮食贸易对国内的冲击,以运输成本最小化为目标,以粮食供需状态为约束条件,结合数据处理结果得到的 OD 成本矩阵,模拟各省粮食交易最优路径。自变量 S_{ij} 为两省份间粮食交易量,OD 成本矩阵作为目标函数中的系数,根据粮食供需计算结果,假设 31 个省市自治区中存在 n 个省份已经实现粮食自给,那么这 n 个省份的粮食盈余量可以实现粮食贸易,即将 n 个省份的粮食盈余量交易给其他 $31-n$ 个省份,利用 Matlab 软件中 linprog 函

数,计算得到各省之间粮食交易量。根据设定构建目标函数计算式如下:

$$\begin{cases} \min(f = \sum_{i=1}^{31-n} \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot S_{ij}) \\ \sum_{j=1}^n S_{ij} = E_i, n \in [1, 31] \\ \sum_{i=1}^{31-n} S_{ij} \leq D_j \\ S_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 i 和 j 表示不同的省份, i 为粮食短缺省份, j 为粮食盈余省份, n 为粮食需求省份总数, $n-1$ 为粮食盈余省份总数, C_{ij} 为 OD 成本矩阵, S_{ij} 为各省份间粮食交易量(万 t), E_i 为 i 省的粮食需求量(万 t), D_j 为 j 省的粮食盈余量(万 t)。

1.3.2 省际粮食贸易碳排放量计算方法

参考贡培琪等^[39]虚拟耕地流计算思路,通过不同省份间粮食交易量与对应需求省份生产单位粮食固定的碳排放量乘积从而构建碳转移流动格局,生产单位粮食固定的碳排放量参考何慧爽^[40]的研究,由此构建粮食贸易碳转移计算式如下:

$$CE = \sum_{i=1, j=1}^{i=31, j=31} (S_{ij} \cdot Q_i) = \sum_{i=1, j=1}^{i=31, j=31} (S_{ij} \cdot \frac{NPP_i}{CY_i}) \quad (2)$$

式中 CE 为粮食交易碳转移总量(万 t), Q_i 为 i 省生产单位粮食大致固定的碳排放量(t), NPP_i 为 i 省的耕地净初级生产力,参考邓宣凯等^[41]的研究,该值为 4.243 t/hm^2 , CY_i 为单位粮食作物播种面积的产量, t/hm^2 。

1.3.3 省际粮食贸易碳排放量责任分担计算方法

粮食输出区承担着重大粮食供给安全责任,面临着巨大的减排压力,而粮食输入区能在宏观调控和市场调节下通过粮食调配缓解区域内供需不平衡矛盾,同时还享受着工业化、城镇化发展的成果,因此输出区与输入区责任与利益存在严重失衡。因此基于减排责任共担的原则,借鉴刘福康^[42]的责任分配系数法,计算粮食贸易碳排放输出区和输入区的共担责任。共担责任分配系数法计算式如下:

$$\begin{cases} p_r = \frac{A}{A+B}, p_s = \frac{B}{A+B} \\ C_r = \sum_{s=1, s \neq r}^{31} p_r \cdot E_{rs} \end{cases} \quad (3)$$

式中 p_r 和 p_s 分别为 r 省和 s 省在共同责任下对省份间粮食贸易碳转移所负责的分配因子, A 和 B 表示不同省份 2020 年的生产总值(亿元), E_{rs} 表示 r 省到 s 省的粮食贸易碳排放转移量(万 t), C_r 表示 r 省承担的碳减排责任(万 t)。

2 结果分析

2.1 省际粮食贸易碳排放及其空间格局

图 2 为 2020 年中国粮食贸易及碳排放分布结果。由图 2 可知,在省际粮食贸易格局中,输出区主要为东北、华北、西北和华中地区,输入区主要为西南、华南和华东地区。2020 年全国粮食贸易总量为 1.53 亿 t,其中,

东北地区累计向外输送 7 126.54 万 t, 占当年粮食贸易总量的 46.7%, 华北地区累计向外输送 2 617.38 万 t, 占当年粮食贸易总量的 17.1%, 西北地区累计向外输送 455.51 万 t, 占当年粮食贸易总量的 3.0%, 华中地区累计向外输送 5 069.71 万 t, 占当年粮食贸易总量的 33.2%。总的来看, 东北地区向外输送最多, 东北地区向外输送粮食约占粮食贸易总量的一半, 其中又以黑龙江向外输出最多 (4 821.41 万 t), 占粮食贸易总量的 31.58%。与相关研究对比, 就贸易格局而言, Wang 等^[43]的研究表明, 内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、河北、河南、山东、安徽、江苏、湖北、湖南、江西、四川等 13 个省级行政区是主要的粮食输出区。从粮食贸易总量来看, 根据国家粮食交易中心数据显示, 2020 年国家政策性粮食累计成交约 1.15 亿 t, 由于当年受新冠疫情影响, 从中储粮集团有限公司 2020 社会责任报告中获悉, 2020 年中储粮累计向市场投放粮油 1.44 亿 t, 约占全国粮食产量的 1/5, 占国内粮食流通量的 1/4。综合来看, 2020 年国内粮食流通总量约为 1.51 亿 t。从地方粮食贸易量来看, 根据黑龙江省科学院研究表明, 2019 年黑龙江省粮食调出量占全国的 1/3^[44]。通过与相关研究、具体统计数据对比分析, 该研究的结果与之较为接近, 说明基于线性规划的计算方法适用于粮食贸易分析, 且该研究的结果具有一定的可靠性。由于东北地区人均耕地面积较大、土壤肥沃、地形平坦、耕地连片度高, 利于大规模机械化耕种, 因此产粮效率高。此外, 2020 年新冠肺炎疫情发生以来, 国家为有效应对新冠肺炎疫情对东北地区农业生产带来的冲击和影响, 制定出台了一系列农业应急政策和惠民政策, 极大地调动了农民种粮的积极性, 有力保障了区域粮食安全, 疏通了粮食流通渠道。而西南地区由于地形地貌、人均耕地资源紧张、优质耕地较少等因素影响, 不利于大规模机械耕种, 生产主体以小规模的家庭农场为主。华南和华东地区经济发达、人口密集、粮食需求量大, 且随着经济的快速发展, 大量优质耕地被建设用地所占用, 导致粮食无法达到供需平衡。

省际粮食贸易碳排放分布格局与粮食贸易格局一致 (图 2b)。2020 年全国粮食贸易碳排放总量为 1.13 亿 t, 其中, 输出区中东北地区累计向外输送 5 378.14 万 t, 占碳排放总量的 47.4%, 华北地区累计向外输送 2 091.82 万 t, 占碳排放总量的 18.4%, 西北地区累计向外输送 295.16 万 t, 占碳排放总量的 2.6%, 华中地区累计向外输送 3 584.19 万 t, 占碳排放总量的 31.6%。在输出区中, 黑龙江、内蒙古、吉林、河南的粮食贸易碳排放较大, 其粮食贸易碳排放均在 1 000 万 t 以上, 在输入区中, 广东、浙江、北京、福建、山东等的粮食贸易碳排放较大。由于输入区人口较多、口粮需求较大, 且输入区多为经济发达地区, 工业用粮需求也较大, 因此粮食生产无法完全自给自足, 伴随着粮食输入的同时也承接了较多的粮食贸易隐含碳排放。

2.2 省际粮食贸易碳转移路径分析

基于粮食贸易模拟结果, 利用式 (2) 计算出粮食贸易过程碳排放, 并在 ArcGIS 中对粮食贸易碳排放流向进

行可视化分析, 以弦图对粮食贸易碳排放流量进行表征, 其中不同颜色代表不同的省区, 关系带代表流向和流量, 同时也对应着输出和输入地区。

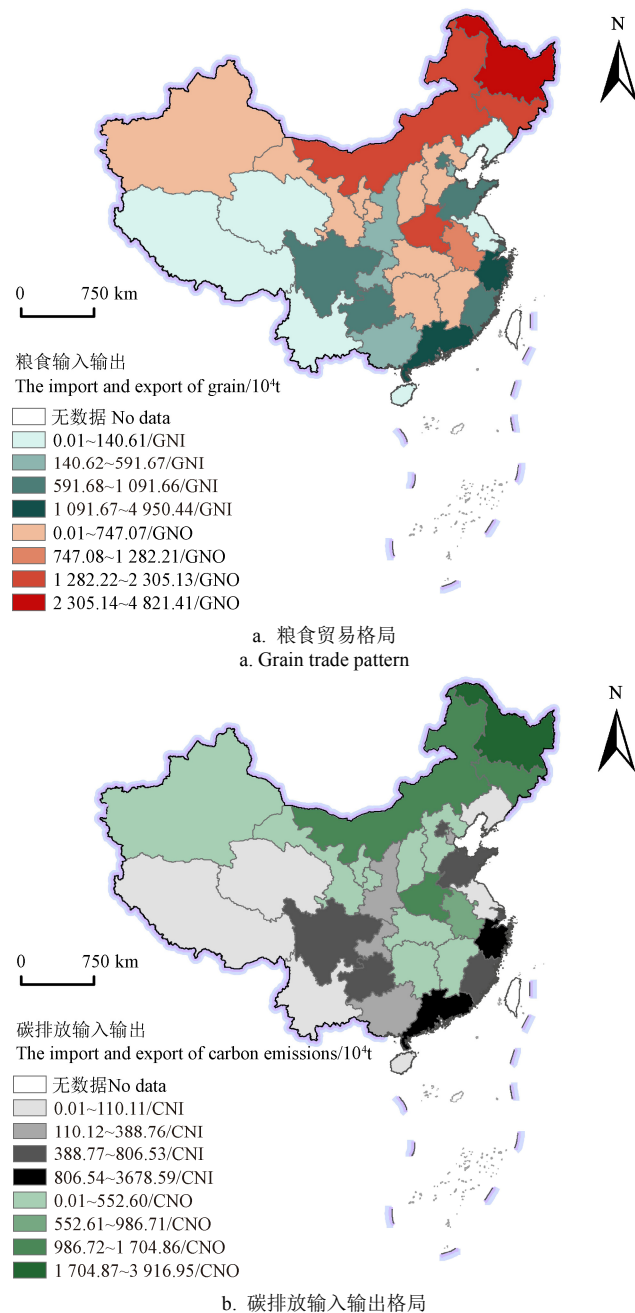


图 2 2020 年中国粮食贸易及碳排放分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of China's grain trade and carbon emissions in 2020

注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站标准地图制作, 底图边界无修改。港澳台数据暂缺。图中 GNI 为粮食净输入量, GNO 为粮食净输出量, CNI 为碳排放净输入量, CNO 为碳排放净输出量。下同。
Note: This map is made based on the standard map download from the standard map service website of the Ministry of Natural Resources. The boundary of the base map is not modified. Due to data unavailability, Hong Kong, Macao, and Taiwan are not included in this study. In the figure, GNI refers to net grain input, GNO refers to net grain output, CNI refers to net input of carbon emissions, and CNO refers to net output of carbon emissions. Same as below.

图 2 2020 年中国粮食贸易及碳排放分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of China's grain trade and carbon emissions in 2020

粮食贸易碳排放在空间上呈现出“北碳南输、中碳西输”的流向格局。粮食贸易碳排放流动格局的形成与粮食贸易格局相关, 改革开放以来, 中国的经济重心逐渐转向东南沿海地区, 在产业上, 发展的重心由农业转

为工业,因此必然导致粮食种植面积减少,为了维持区域内粮食供销平衡,需要从其他省份补充。而北方和中部省份随着现代化农业技术的推广应用,有效地实现了增产增收,逐渐形成了“北粮南运、中粮西运”的粮食贸易格局。技术变革带来的北方和中部粮食增产,同时也是市场发展对自然资源的调配和优化,以及政策对粮食生产的保障等因素共同影响。从图 3 可以看出,粮食输出省份较东部和南部沿海省份经济仍有一定的差距,在大力向外输出粮食的同时也承受着较大的减排压力,因此未来亟需探寻公平合理的责任共担碳减排模式和碳补偿机制。

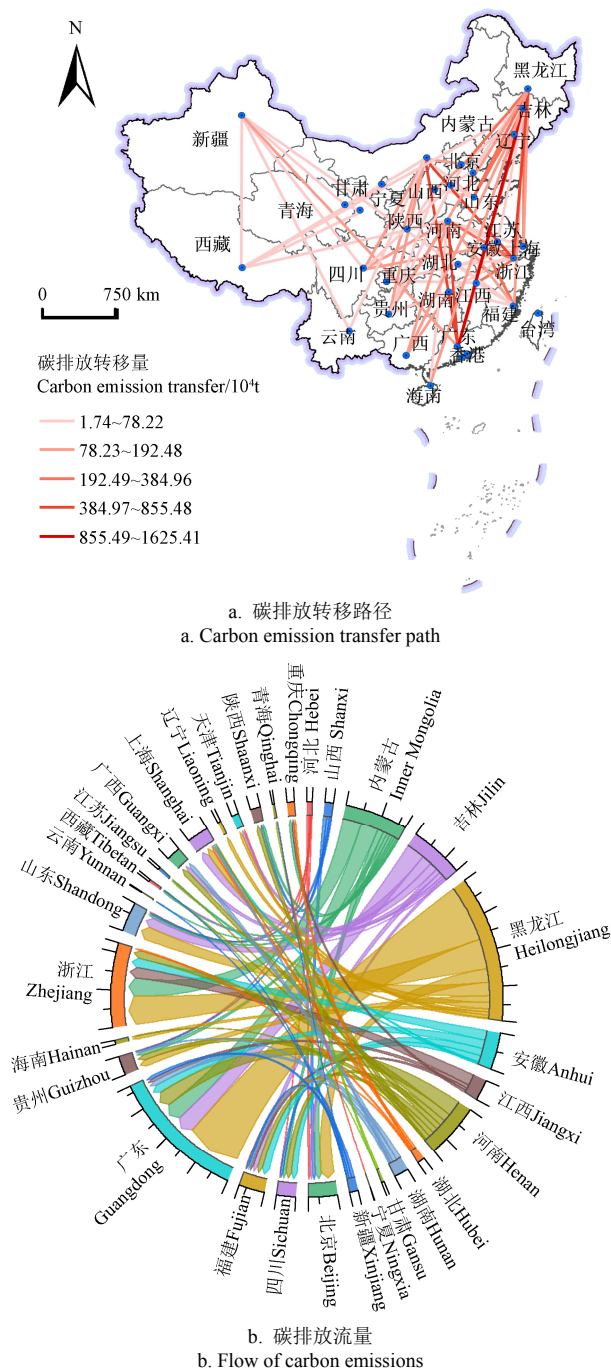


图 3 2020 年中国粮食贸易碳排放转移路径特征

Fig.3 Characteristics of carbon emission transfer path of China's grain trade in 2020

粮食贸易碳排放呈现南一北大、东一西小的流量特征。根据粮食贸易碳排放模拟结果显示,河北、山西、

内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、甘肃、宁夏、新疆是全国粮食碳排放输出区,与其他省份共有 76 条贸易记录,其中,南北方向粮食贸易碳排放共有 48 条记录,粮食贸易碳排放流量共计 9 119.82 万 t,东西方向粮食贸易碳排放共有 28 条记录,粮食贸易碳排放流量共计 2 229.49 万 t,其中粮食贸易碳排放最大的是黑龙江到广东,为 1 625.41 万 t,占粮食贸易碳排放总量的 14.3%,其次为黑龙江到浙江、内蒙古到浙江、吉林到广东,其流量分别为 855.48 万 t、539.12 万 t、533.60 万 t。粮食贸易碳排放最小的是新疆到青海,仅为 1.74 万 t。在输出区中,黑龙江向外省输出的粮食贸易碳排放最大,为 3 916.95 万 t,河南省向其他省份输出的粮食贸易碳排放记录最多,共有 11 条输出记录。在输入区中,广东省粮食贸易碳排放量最大,为 3 678.59 万 t,且粮食贸易碳排放记录也最多,共有 8 条输入记录。

2.3 省际粮食贸易碳排放责任分担

各省份间存在着巨大的粮食贸易往来,这也导致了省域间存在着较为严重的“碳泄露”,单一的生产者责任或消费者责任无法准确合理地分配碳减排责任,只有将粮食贸易碳排放责任公平划分,各省份才能在碳减排行动中发挥积极的作用。利用式(3)测算出粮食贸易碳转移过程中不同省份的应承担的责任(表 1),得到共担责任下各省份的粮食贸易碳排放责任分布特征。

中国粮食贸易碳排放转移过程中输入区较输出区而言应承担的碳减排责任更大。2020 年,因粮食贸易产生的碳排放总量为 1.13 亿 t,输出区分担碳减排比例平均为 29.5%,输入区分担比例平均为 70.5%。13 个输出省在共担责任原则下的减排责任比碳排放转移中间量低 24.52%~80.74%,共担原则下输出区减排责任为 3 347.57 万 t,输出区减排责任相比粮食贸易碳排放转移量少 8 001.74 万 t。究其原因,2020 年粮食贸易碳排放输出区省份 13 个,主要分布在北部和中部等经济欠发达地区,而粮食贸易碳排放输入区省份为 18 个,且较多分布在东部沿海和华南等经济发达地区,对于粮食输入省份而言,以帮扶效应作为分担系数的共同责任准则较大程度缓解了减排压力,有利于提高粮食输出区种粮积极性。对于粮食需求省份而言,在获取粮食的过程中会承担相应的碳减排责任,也基本体现了“收益大,责任大”的分配思路,与 Zhang^[45]的研究基本一致,即经济发达省份的责任占比较大,而经济规模较小的省份责任也相对较小。总体而言,基于共同责任分担原则,不仅有利于同时控制输出区、输入区的碳排放和碳转移量,而且对于稳固粮食主产区产量有积极作用。

从区域视角而言,输出区中安徽、黑龙江、吉林、江西、内蒙古、山西和新疆的分担比例较低,甘肃、河北、河南、湖北、湖南和宁夏的分担比例较高。输出区中安徽、黑龙江、吉林、江西、内蒙古、山西和新疆的分担比例分别为 38.1%、19.5%、19.3%、30.4%、25.9%、33.9%、20.6%,而甘肃、河北、河南、湖北、湖南和宁夏的分担比例分别为 77.5%、55.9%、52.3%、53.1%、48.5%、56.7%。输出区中分担比例较低的原因

是安徽、黑龙江、吉林、江西、内蒙古、山西和新疆的经济发展水平较低，而其粮食主要对口经济发达的省份，在粮食贸易碳排放转移过程中，受到其他经济发达省份的帮扶较多。输出区中分担比例较高的原因

是，甘肃、河北、河南、湖北、湖南和宁夏的粮食贸易多集中于经济发展水平较低的地区，从而在帮扶效应中对其他经济欠发达省份的帮扶较多，因此承担了较多减排责任。

表 1 共担原则下粮食贸易碳排放责任分配表

Table 1 Carbon emission responsibility distribution table of grain trade based on the principle of shared responsibility (10⁴t)

输出区 Output area	碳转移量 Amount transfer of carbon emission	输入区 Input area	输出区责任 Output area responsibility	输入区责任 Input area responsibility	输出区 Output area	碳转移量 Amount transfer of carbon emission	输入区 Input area	输出区责任 Output area responsibility	输入区责任 Input area responsibility
安徽 Anhui	986.71	江苏	7.00	18.58	湖南 Hunan	389.78	贵州	24.59	10.49
		上海	20.24	20.25			上海	22.26	20.62
		四川	78.85	99.07			福建	28.51	29.96
		福建	100.00	113.50			广西	76.41	40.52
		广东	64.47	184.62			广东	37.37	99.05
		浙江	104.90	175.23	吉林 Jilin	1 461.19	西藏	6.60	1.02
甘肃 Gansu	59.79	西藏	3.16	0.67			北京	17.31	50.77
		青海	41.97	13.99			天津	33.33	38.13
		四川	6.14	8.25			广西	43.57	78.40
河北 Hebei	145.86	山东	4.83	9.77			福建	29.77	106.17
		贵州	9.82	4.83			上海	55.19	173.50
		天津	31.54	12.27			山东	42.34	251.49
		北京	29.25	29.16			广东	53.38	480.22
		西藏	7.04	0.24	江西 Jiangxi	552.61	重庆	32.58	31.70
河南 Henan	1 466.97	江苏	3.46	6.46			福建	26.03	44.48
		海南	17.25	1.73			广东	18.15	78.27
		上海	13.72	9.66			浙江	91.44	229.96
		陕西	85.12	40.52	内蒙古 Inner Mongolia	1 704.87	云南	4.76	6.73
		福建	82.32	65.71			西藏	44.48	4.87
		贵州	112.91	36.60			山东	12.83	54.03
		广西	106.82	43.04			陕西	26.67	40.22
		四川	86.44	76.39			重庆	35.92	51.74
		浙江	104.58	122.87			四川	24.36	68.19
		广东	147.35	296.74			贵州	52.05	53.44
		江苏	4.03	30.19			北京	57.28	119.11
		天津	38.57	39.65			广东	68.98	440.09
		辽宁	32.00	58.68			浙江	114.17	424.95
黑龙江 Heilongjiang	3 916.96	海南	64.91	26.22	宁夏 Ningxia	7.20	青海	4.08	3.12
		上海	47.41	133.94	山西 Shanxi	241.10	贵州	10.80	10.90
		贵州	83.64	108.84			山东	9.38	38.84
		山东	60.43	322.60			陕西	29.13	43.20
		北京	105.89	279.07			北京	32.46	66.39
		浙江	149.64	705.84	新疆 Xinjiang	228.16	青海	1.43	0.31
		广东	178.90	1 446.51			西藏	3.70	0.51
湖北 Hubei	188.11	福建	9.47	9.57			云南	2.57	4.57
		浙江	15.91	23.66			福建	12.86	40.91
		重庆	36.26	20.87			四川	16.98	59.83
		上海	38.27	34.10			广东	9.36	75.13

3 讨 论

粮食生产系统极具敏感性和脆弱性，主要表现在以下两方面：一是对干旱、高温、强降水、病虫灾害等常规自然灾害具有敏感性和脆弱性，二是对“黑天鹅事件”极具敏感性和脆弱性，例如 2020 年的新冠疫情。目前中国针对常规自然灾害已经有较为健全和成熟的农业防灾减灾应急机制，例如《“十四五”国家应急体系规划》、《“十四五”国家综合防灾减灾规划》的颁布说明国家的应急和综合保障能力大幅提升，而对“黑天鹅事件”的应急预案建设还处于摸索和完善阶段。2020 年的新冠疫情对中国粮食的生产、消费和流通环节有一定的影响^[46]，从粮食生产环节而言，由于疫情导致劳动力移动受限，进

一步加剧了农业劳动力短缺，此外，在疫情开始时期，农资价格上涨和流通受阻，种粮成本上升，挫伤了农民种粮积极性，也给粮食生产带来了较大的负面影响。从粮食消费环节来看，受疫情影响导致粮食价格上涨，居民收入下降，因此从客观层面而言削弱了居民的粮食购买能力。从粮食流通环节来看，疫情期间“封村封路”等措施导致国内各区域联通性减弱，区域间粮食运输受阻，局部省份出现了“卖粮难”等问题。由于数据搜集较为困难，因此无法利用粮食贸易线性规划方法模拟新冠疫情对于省际粮食贸易的影响，未来可结合调查统计数据，定量分析疫情对于粮食生产、消费和流通环节的影响，以及针对性制定相应的应对措施，构建长效的应急机制。

粮食贸易通过地域分工和区际流通可有效解决区域粮食供需矛盾,然而由于统计数据获取较为困难,以及考虑到投入产出模型的时效性和局限性,采用了线性规划模型对省际粮食贸易情况进行了分析,省际间粮食贸易结果直接影响到碳排放转移空间格局,因此对粮食贸易结果的评估是至关重要的一环。就研究方法而言,线性规划模型已被应用到各个领域,且在粮食贸易量化方面也有较好的适用性^[36]。从研究结果来看,一是省际粮食贸易格局与相关类似成果较为接近^[43],二是省际粮食贸易量与 2020 年国内粮食流通总量统计数据较为接近,因此可以利用该方法模拟省际间粮食贸易。为了对线性规划模型进行定量评价,未来可以长期收集粮食贸易数据,通过实际收集的粮食贸易数据精确验证模型的准确性以及结果的可靠性。

省际粮食贸易碳排放流量通过不同省份间粮食交易量与对应需求省份生产单位粮食固定的碳排放量乘积而得到,在粮食贸易流量的基础上,碳排放流量的大小取决于生产单位粮食固定的碳排放量,此种方法也被多位学者使用^[40-41]。生产单位粮食固定的碳排放量与耕地净初级生产力、粮食产量等因素有关,而耕地净初级生产力与化肥施用量、气温、降水、日照时数等因素相关,由于全国各省自然条件、资源禀赋存在差异,所以未来可增加全国典型观测样点,通过干燥系数、收货指数、根冠比指数等计算不同区域的耕地净初级生产力^[47],使粮食生产碳排放估算结果越接近于真实值。

4 结论与政策建议

4.1 结 论

本研究采用 2020 年中国 31 个省级行政区截面数据,基于粮食贸易线性规划方法和粮食贸易碳排放量计算模型对省际粮食贸易及其碳排放进行了核算,并揭示了其空间转移格局;采用粮食贸易碳排放量责任分担计算方法探讨了各省份粮食贸易碳排放责任分布特征。主要结论如下:

1) 在省际粮食贸易与粮食贸易碳排放格局中,输出区主要为东北、华北、西北和华中地区,输入区主要为西南、华南和华东地区。2020 年全国粮食贸易总量为 1.53 亿 t,其中,输出区中东北地区累计向外输送 7 126.54 万 t,占贸易总量的 46.7%,华北地区累计向外输送 2 617.38 万 t,占贸易总量的 17.1%,西北地区累计向外输送 455.51 万 t,占贸易总量的 3.0%,华中地区累计向外输送 5 069.71 万 t,占贸易总量的 33.2%。

2) 粮食贸易碳排放空间上呈现出“北碳南输、中碳西输”的流向格局,粮食贸易碳排放呈现“南一北”大、“东一西”小的流量特征。河北、山西、内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、甘肃、宁夏、新疆是全国粮食碳排放输出区,南北方向粮食贸易碳排放流量共计 9 119.82 万 t,东西方向粮食贸易碳排放流量共计 2 229.49 万 t。

3) 中国粮食贸易碳排放转移过程中输入区较输出区而言应承担的碳减排责任更大。输出区分担碳减排比例

平均为 29.5%,输入区分担比例平均为 70.5%。13 个输出省在共担责任原则下的减排责任比碳排放转移中间量低 24.52%~80.74%。共担原则下输出区减排责任为 3 347.57 万 t,输出区减排责任相比粮食贸易碳排放转移量减少 8 001.74 万 t。

4) 从区域视角而言,输出区中安徽、黑龙江、吉林、江西、内蒙古、山西和新疆的分担比例较低,甘肃、河北、河南、湖北、湖南和宁夏的分担比例较高。

4.2 政策建议

在共同责任分担下推动区域协同减排对于实现粮食安全、推动农业绿色可持续发展具有重要意义。为区域保障粮食安全、也更公平合理分配区域间碳减排责任,提出以下政策建议:1) 稳固东北、华北、西北和华中地区粮食生产重任,提高西南、华南和华东地区粮食产量。对于东北、华北、西北和华中地区而言,应深入实施“藏粮于地、藏粮于技”战略,推进耕地质量保护与提升,同时应不断探索完善粮食安全与利益补偿机制,调动农民生产积极性,保持粮食产能稳定。对于西南、华南和华东地区而言,应制止耕地“非农化”,防止耕地“非粮化”,加大农业基础设施投入力度,积极推进丘陵区农业机械化,逐步推进高标准农田建设,发展多季粮食种植优势,拓宽粮食稳产增产渠道;2) 提高农业绿色生产效率,降低粮食输出区碳排放。推动规模化经营和农业精准施肥灌溉技术,优化农业水土资源配置,提高农业生产效率,以降低粮食生产的隐含碳排放;3) 尝试开展基于隐含碳转移的粮食贸易碳补偿试点。以碳排放责任分担结果为参考,科学合理分配输出区与输入区碳减排责任,确定合理的碳补偿标准,探索多样化的补偿方式,开展区域碳补偿试点,为区域协同减排、推动农业领域实现“双碳”目标的实现提供实践指导。4) 构建对口长效帮扶机制。由于粮食贸易碳排放输入区省份较多分布在东部沿海和华南等经济发达地区,且输入区承担了较多的碳减排责任,因此可以构建“一对一”或“一对多”的对口帮扶机制,经济发达地区可以依据碳转移量大小对粮食输出区提供先进农业生产技术、装备与减排技术指导,以实现全产业链的绿色低碳发展。

【参 考 文 献】

- [1] 宋敏,刘学敏.西北地区能源—环境—经济可持续发展预警研究—以陕西省为例[J].中国人口·资源与环境,2012,22(5): 133-138.
Song Ming, Liu Xuemin. Early warning research of energy industry of sustainability development in Shaanxi[J]. China Population Resources and Environment, 2012, 22(5): 133-138. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李红芳,王会肖,赵茹欣,等.基于 Copula 函数的水-能源-粮食共生安全风险概率[J].农业工程学报,2021,37(8): 332-340.
Li Hongfang, Wang Huixiao, Zhao Ruxin, et al. Estimating the symbiosis risk probability of water-energy-food using Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 332-340. (in Chinese with English abstract)

- [3] Cansino-Loeza B, Ponce-Ortega J M. Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 290(3): 125194.
- [4] Burrows M. *Global Trends 2030: Alternative Worlds*[R]. Washington: NIC, 2012.
- [5] 谢淑娟, 匡耀求, 黄宁生. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12): 46-51. Xie Shujuan, Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng. Main paths and policy proposals for the development of carbon-sinking agriculture in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(12): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- [6] Vemeulen S J, Campbell B M, Ingram J. Climate change and food systems[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2012, 37(1): 195-222.
- [7] 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): 3892-3902. Zhang Weijian, Yan Shengji, Zhang Jun, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3892-3902. (in Chinese with English abstract)
- [8] Chen Y H, Wen X W, Wang B, et al. Agricultural pollution and regulation: How to subsidize agriculture?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164(10): 258-264.
- [9] 汪开英, 李鑫, 陆建定, 等. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 230-238. Wang Kaiying, Li Xin, Lu Jianding, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 230-238. (in Chinese with English abstract)
- [10] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2022(3): 104-127. Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3): 104-127. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li Y, Li J. How does China's economic policy uncertainty affect the sustainability of its net grain imports?[J]. *Sustainability*, 2021, 13(12): 1-12.
- [12] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628. Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628. (in Chinese with English abstract)
- [13] Petrs G P, Hertwich E G. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401-1407.
- [14] 蒋雪梅, 郑可馨. 京津冀地区间贸易隐含碳排放转移研究[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(6): 126-130. Jiang Xuemei, Zheng Kexin. The embodied CO₂ emissions transfer in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Areal Research and Development*, 2019, 38(6): 126-130. (in Chinese with English abstract)
- [15] Duan J, Nie C, Wang Y, et al. Research on global grain trade network pattern and its driving factors[J]. *Sustainability*, 2022, 14(1): 1-17.
- [16] 王介勇, 戴纯, 周墨竹, 等. 全球粮食贸易网络格局及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1545-1556. Wang Jieyong, Dai Chun, Zhou Mozhu, et al. Research on global grain trade network pattern and its influencing factors[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6): 1545-1556. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吕梦珂, 张丽君, 秦耀辰, 等. 1987—2016 年中国粮食贸易时空格局演变及贸易结构安全性评估[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 838-848. Lv Mengke, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Spatiotemporal pattern of Chinese food trade and structural security assessment, 1987-2016[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 838-848. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高守杰, 郭光毅, 代希波. 基于道路网络分析的省际粮食运输成本研究[J]. *物流科技*, 2014, 37(5): 135-139. Gao Shoujie, Guo Guangyi, Dai Xibo. Research of inter-provincial grain transport costs based on GIS network analyst[J]. *Logistics Sci-tech*, 2014, 37(5): 135-139. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang Y, Zhang J, Tang G, et al. Virtual water flows in the international trade of agricultural products of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557(7): 1-11.
- [20] Fu Y C, Zhao J, Wang C, et al. The virtual water flow of crops between intraregional and interregional in mainland China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208(9): 204-213.
- [21] 王维方, 刘爱民, 强文丽. 中国大豆资源的虚拟土贸易及进口依存度分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1139-1147. Wang Weifang, Liu Aimin, Qiang Wenli. Virtual land trades and external dependences of China's soybean resources[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1139-1147. (in Chinese with English abstract)
- [22] 强文丽, 张翠玲, 刘爱民, 等. 全球农产品贸易的虚拟耕地资源流动演变及影响因素[J]. *资源科学*, 2020, 42(9): 1704-1714. Qiang Wenli, Zhang Cuiling, Liu Ai Min, et al. Evolution of global virtual land flow related to agricultural trade and driving factors[J]. *Resources Science*, 2020, 42(9): 1704-1714. (in Chinese with English abstract)
- [23] 梁流涛, 唐林昊, 李士超, 等. 基于生态网络架构的虚拟耕地流动格局及其稳定性评价[J]. *经济地理*, 2020, 40(1): 140-149. Liang Liutao, Tang Linhao, Li Shichao, et al. Virtual cultivated land flow pattern and its stability evaluation of based on ecological network architecture[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 140-149. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈晖, 温婧, 庞军, 等. 基于 31 省 MRIO 模型的中国省际碳转移及碳公平研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5540-5550. Chen Hui, Wen Jing, Pang Jun, et al. Research on the carbon transfer and carbon equity at provincial level of China based on MRIO model of 31 provinces[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(12): 5540-5550. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孟凡鑫, 苏美蓉, 胡元超, 等. 中国及“一带一路”沿线典型国家贸易隐含碳转移研究[J]. *中国人口·资源与环境*,

- 2019, 29(4): 18-26.
- Meng Fanxin, Su Meirong, Hu Yuanchao, et al. Embodied carbon in trade of China and typical countries along the "Belt and Road"[J]. *China Population Resources and Environment*, 2019, 29(4): 18-26. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王振宇. 基于省际贸易的 2002-2012 年间中国各省区碳排放转移测度及影响因素分析[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
- Wang Zhenyu. The Measurement and Influencing Factors of Carbon Emission Transfer in China's Provinces During 2002-2012 Based on Inter Provincial Trade[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张同斌, 孙静. "国际贸易—碳排放"网络的结构特征与传导路径研究[J]. *财经研究*, 2019, 45(3): 114-126.
- Zhang Tongbin, Sun Jing. A research on the structural characteristics and transmission path of the "international trade carbon emission" network[J]. *The Study of Finance and Economics*, 2019, 45(3): 114-126. (in Chinese with English abstract)
- [28] 余娟娟, 龚同. 全球碳转移网络的解构与影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(8): 21-30.
- Yu Juanjuan, Gong Tong. Analyzing the deconstruction and influencing factors of the global carbon transfer network[J]. *China Population Resources and Environment*, 2020, 30(8): 21-30. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐盈之, 邹芳. 基于投入产出分析法的我国各产业部门碳减排责任研究[J]. *产业经济研究*, 2010 (5): 27-35.
- Xu Yingzhi, Zou Fang. Carbon reduction responsibility of China's industries based on the input-output analysis[J]. *Industrial Economics Research*, 2010 (5): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- [30] 付坤, 齐绍洲. 中国省级电力碳排放责任核算方法及应用[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(4): 27-34.
- Fu Kun, Qi Shaozhou. Accounting method and its application of provincial electricity CO₂ emissions responsibility[J]. *China Population Resources and Environment*, 2014, 24(4): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [31] Tao X, Wang P, Zhu B. Measuring the interprovincial CO₂ emissions considering electric power dispatching in China: from production and consumption perspectives[J]. *Sustainability*, 2016, 8(6): 506.
- [32] 王文治. 中国省域间碳排放的转移测度与责任分担[J]. *环境经济研究*, 2018, 3(1): 19-36.
- Wang Wenzhi. Calculation on net value of carbon emission transfer between China's provinces and responsibility sharing[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2018, 3(1): 19-36. (in Chinese with English abstract)
- [33] 马静, 张红旗, 李慧娴, 等. 粮食国际贸易对我国水土资源利用的影响分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(11): 1723-1728.
- Ma Jing, Zhang Hongqi, Li Huixian, et al. Impacts of international grain trade on utilization of water and cultivated land[J]. *Resources Science*, 2008, 30(11): 1723-1728. (in Chinese with English abstract)
- [34] 钱海洋. 中国区域间粮食贸易量化方法及虚拟水流动格局评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- Qian Haiyang. Development of Quantitative Method of Inter-provincial Grain Trade and Evaluation of Virtual Water Flow Pattern in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张光杰. 中国跨省粮食贸易中的水资源节约量测算方法研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021.
- Zhang Guangjie. Study on the Calculation Method of Water Resources in China's Interprovincial Food Trade[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [36] Sun S K, Yin Y L, Wu P T, et al. Geographical evolution of agricultural production in China and its effects on water stress, economy and the environment: the virtual water perspective[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 4014-4029.
- [37] 杨明智, 裴源生, 李旭东. 中国粮食自给率研究: 粮食、谷物和口粮自给率分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 881-889.
- Yang Mingzhi, Pei Yuansheng, Li Xudong. Study on grain self-sufficiency rate in China: An analysis of grain, cereal grain and edible grain[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 881-889. (in Chinese with English abstract)
- [38] 肖玉, 成升魁, 谢高地, 等. 我国主要粮食品种供给与消费平衡分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 927-936.
- Xiao Yu, Cheng Sheng Kui, Xie Gaodi, et al. The balance between supply and consumption of the main types grain in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 927-936. (in Chinese with English abstract)
- [39] 贲培琪, 吴绍华, 李啸天, 等. 中国省际粮食贸易及其虚拟耕地流动模拟[J]. *地理研究*, 2016, 35(8): 1447-1456.
- Ben Peiqi, Wu Shaohua, Li Xiaotian, et al. China's inter-provincial grain trade and its virtual cultivated land flow simulation[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(8): 1447-1456. (in Chinese with English abstract)
- [40] 何慧爽. 农业潜在资源流动的生态资本权益补偿问题研究—基于“北粮南运”格局下的数据分析[J]. *价格理论与实践*, 2017 (8): 28-31.
- He Huishuang. Research on the compensation of the rights and interests of ecological capital in the flow of agricultural potential resources—Data analysis based on the pattern of "Northe Grain South transportation"[J]. *Price: Theory&Practice*, 2017(8): 28-31. (in Chinese with English abstract)
- [41] 邓宣凯, 刘艳芳, 李纪伟. 区域能源碳足迹计算模型比较研究—以湖北省为例[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1533-1538.
- Deng Xuankai, Liu Yanfang, Li Jiwei. Comparative study on regional carbon footprint of energy consumption calculation models: A case study of Hubei province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1533-1538. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘福康. 中国省域净碳转移测度与责任分担研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2021.
- Liu Fukang. Study on measurement of provincial net carbon transfer and responsibility sharing in China[D]. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [43] Wang Z Z, Zhang L L, Ding X L, et al. Virtual water flow pattern of grain trade and its benefits in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223(6): 445-455.
- [44] 黑龙江省科学院. 汇聚科技之力赋能农业创新: 黑龙江省科学院助力全省农业产业发展[J]. *黑龙江粮食*, 2020, 4(6):

- 11-14.
- [45] Zhang Y G. Provincial responsibility for carbon emissions in China under different principles[J]. *Energy Policy*, 2015, 86(11): 142-153.
- [46] 钟钰, 普莫喆, 刘明月, 等. 新冠肺炎疫情对我国粮食安全的影响分析及稳定产量的建议[J]. *农业经济问题*, 2020 (4): 13-22.
- Zhong Yu, Pu Mingzhe, Liu Mingyue, et al. The impact of COVID-19 on China's food security and suggestions for ensuring stable grain production[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2020(4): 13-22. (in Chinese with English abstract)
- [47] 王铁虹, 王美艳, 史学正, 等. 2010 年中国农作物净初级生产力及其空间分布格局[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6318-6327.
- Wang Yihong, Wang Meiyan, Shi Xuezheng, et al. Spatial patterns of net primary productivity of crops in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6318-6327. (in Chinese with English abstract)

Spatial pattern and responsibility sharing of carbon transfer in China's inter-provincial grain trade

Yang Qinglin¹, Zhao Rongqin^{1*}, Luo Huili¹, Zhu Ruiming², Xiao Liangang¹, Xie Zhixiang¹, Sun Jin¹

(1. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: The spatial pattern of carbon transfer is of practical significance for the responsibility sharing of carbon emission reduction. It is a high demand to explore the inter-provincial collaborative strategies of carbon emission reduction for food security. In this study, the inter-provincial grain trade and the carbon emission were calculated to determine the spatial transfer using the linear programming model of carbon emission in the grain trade. The cross-sectional data was selected from 31 provincial administrative regions in China in 2020. The distribution characteristics were analyzed for the carbon emission responsibility sharing of the grain trade in each province. The results were as follows: 1) In the carbon emission pattern of inter-provincial grain trade, the export areas were mainly distributed in the northeast, north, northwest, and central China, whereas, the import areas were mainly in the southwest, south, and east China. The total amount of grain trade was 1.53×10^8 t in China in 2020. Among the grain export areas, northeast, north, northwest, and central China transported 71.265 4, 26.173 8, 4.555 1, and 50.697 1 million tons, accounting for 46.7%, 17.1%, 3.0%, and 33.2% of the total trade volume, respectively. 2) The carbon emission of grain trade showed the flow pattern of “North carbon to South and China carbon to the west” in space, indicating the small flow from the south to the north and the east to the west. The national export areas of grain carbon emission included the Hebei, Shanxi, Inner Mongolia, Jilin, Heilongjiang, Anhui, Jiangxi, Henan, Hubei, Hunan, Gansu, Ningxia, and Xinjiang regions. The carbon emission flows of the grain trade in the north-south and east-west directions were $9\ 119.82 \times 10^4$, and $2\ 229.49 \times 10^4$ t, respectively. 3) The input area was needed to pay greater responsibility for the carbon emission reduction than the output area in the process of carbon emission transfer of grain trade. Economically developed provinces presented a relatively large share of responsibility, while those with smaller economies were relatively small responsibilities. There were 29.5% and 70.5% average proportions of carbon emission reduction shared by the output and the input area, respectively. 4) In the principle of shared responsibility, there was a low share proportion in Anhui, Heilongjiang, Jilin, Jiangxi, Inner Mongolia, Shanxi, and Xinjiang in the export areas, and the high share proportion was in Gansu, Hebei, Henan, Hubei, Hunan, and Ningxia. Influenced by the assistance effect, economically developed provinces provide more assistance to economically underdeveloped provinces and will assume more responsibility for emission reduction. In general, based on the principle of shared responsibility, it is not only conducive to controlling carbon emissions in export and import areas, but also plays a positive role in stabilizing the output of major grain producing areas. Therefore, the study puts forward targeted strategies to ensure regional food security and fair and reasonable distribution of carbon emission reduction responsibilities among regions, so as to achieve the win-win goal of “carbon neutral, carbon peak” strategy and food security.

Keywords: grain; carbon emissions; emission control; carbon transfer; spatial pattern; shared responsibility