

碳中和目标下我国省域碳生态补偿

——基于责任共担视角的研究

王文治 张晓宇*

摘要:区域碳生态补偿是实现我国碳中和目标的有效途径,其前提是合理界定区域碳排放和碳汇。相对碳汇核算,区域碳排放责任界定因碳转移问题而更加复杂,因此,构建公平的区域碳生态补偿方案需先公平界定区域碳排放责任。基于MRIO模型,本文在共担责任原则下公平界定了省域碳排放,并结合碳汇核算结果,将共担责任原则下的省域碳排放嵌入省域生态安全评级和绝对以及相对碳生态补偿方案。研究结果表明:共担责任原则体现“利益大,责任大”的分配思路,相对生产责任原则和消费责任原则更加折中。我国省域生态安全指数呈现“东高西低”特征,东部省域难以通过自身碳汇产业发展来实现碳抵消,而需要与西部碳汇资源丰富的省域以碳生态补偿的方式实现碳中和。省域绝对和相对碳生态补偿方案将碳责任补偿和碳中和补偿结合,且生产责任原则下被高估碳排放责任的省域、碳汇总量丰富和经济欠发达的省域通常会得到碳补偿,该分配方案体现了目标与责任兼顾、公平与效率结合的特征。本文研究结论为我国实现碳中和目标提供了理论依据和政策参考。

关键词:碳排放责任;碳生态补偿;碳汇;碳排放双控

一、引言

党的二十届三中全会审议通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》提出“推进生态综合补偿,健全横向生态保护补偿机制”“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。碳中和目标是实现“人与自然和谐共生”的战略安排(吴立军、田启波,2022)。当前,我

*王文治(通讯作者),天津师范大学经济学院,邮政编码:300387,电子邮箱:wangwz_zjgs@126.com;张晓宇,天津师范大学经济学院,邮政编码:300387,电子邮箱:ZhangXY010206@outlook.com。

本文系国家统计局2024年度全国统计科学研究项目“碳中和目标下我国省域生态安全评级和碳生态补偿研究”(2024LY061)、国家社会科学基金一般项目“碳排放责任共担核算体系与中国区域碳减排合作路径研究”(19BJY084)、国家社会科学基金一般项目“美国芯片产业政策效应评估与中国芯片产业供应链建构研究”(23BGJ026)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的宝贵修改建议。文责自负。

国碳汇增长相对缓慢,从2000年的29.6亿吨上升至2022年的36.8亿吨,年均增长速度仅0.98%^①;碳排放从2000年的30.03亿吨上升至2019年的97.9亿吨,年均增长速率为6.4%^②,2030年碳达峰之前碳汇与碳排放之间的缺口仍将不断扩大。此外,各省域自然碳汇储备不平衡,部分地区难以通过自身碳汇产业发展来实现碳中和(张永泽等,2022)。鉴于此,区域间横向碳生态补偿有助于缓解负外部性,公平合理调整区域间碳排放、碳汇的不平衡并提高减排效率。碳达峰在即,在碳中和目标下能耗双控将向碳排放双控全面转型。2024年8月2日,国务院办公厅印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》,提出“碳达峰后,实施以总量控制为主、强度控制为辅的碳排放双控制度,建立碳中和目标评价考核制度”。未来碳排放总量和强度将成为中央对地方考核的重要指标。然而,省域间贸易引致的碳转移问题使得省域碳排放责任划分不清,污染边界不明,产生较大争议。鉴于此,如何从公平和效率视角,采用科学的碳排放责任核算方法来界定省域碳排放,进而创建公平的省域碳生态补偿方案,是实现碳中和目标的重要途径。

生态补偿概念源于20世纪70年代,一般将其表述为“生态系统服务付费”(Payment for Ecosystem Services, PES),是以生态系统持续利用为目的,以生态服务价值或保护成本为依据,对生态利益相关方损益关系进行调节的制度安排(Engel et al., 2008)。我国生态补偿实践以生态环境的正负两种外部性为主线(李国平、刘生胜, 2018;汪惠青、单钰理, 2020),可分为两个阶段:一是20世纪70年代至90年代末以治理生态环境负外部性为主的生态补偿(惩罚机制为主);二是21世纪初开始以奖励生态环境正外部性为主的生态补偿(激励与惩罚机制并存)。补偿形式分为政府购买模式和市场补偿模式。生态补充理论主要起源于外部性理论(庇古范式和科斯范式)、自然(生态)资本理论(Carpenter et al., 2009; 郇庆治, 2013)及生态正义理论(Huan, 2017)。碳生态补偿是低碳经济背景下生态补偿研究的新领域(赵荣钦等, 2015),是生态补偿的理论构思与低碳行动的结合。按生态补偿理论内涵,碳生态补偿可被定义为碳排放主体以经济或非经济方式对碳汇主体或生态保护者给予一定补偿的行为(赵荣钦等, 2016)。碳生态补偿的核心问题是如何确定补偿标准,这直接决定了碳补偿制度的科学性和有效性(牛志伟、邹昭晞, 2019)。碳生态补偿标准大致可归为三类:一是从碳汇价值角度确定碳补偿标准(于金娜、姚顺波, 2012; Yu et al., 2016)。二是从补偿意愿角度确定碳补偿标准(王立国等, 2020)。上述两类方法均是以政府为主导的纵向碳补偿制度,表现为政府为获得碳减排绩效对生态系统修复主体采取的激励措施,研究领域多集中于森林(Yu et al., 2014)、农业(Xiong et al., 2017; 吴昊玥等, 2020; 曹俊文、陶强强, 2021)、旅游业(丁晨希、王立国,

①基于CNKI中国经济社会大数据研究平台,根据本文的碳汇核算方法计算得出。

②根据中国碳核算数据库(CEADs)发布的历年碳排放数据测算得出。

2020)等。三是从碳中和视角确定碳补偿标准(赵荣钦等,2016;陈儒、姜志德,2018;吴立军、田启波,2022)。在该补偿方法下,碳赤字地区需要支付相应的金额来弥补其对生态环境造成的负面影响;而碳盈余地区则应获得补贴以回报其对生态环境所作出的贡献。本质上碳补偿是通过资源再分配来调节社会和生态的公平性。鉴于此,公平性是构建碳生态补偿制度的核心原则,具体表现为如何公平合理地界定区域碳排放和碳汇。相对碳汇核算,区域碳排放责任认定因碳转移问题而更加复杂,且争议较大。因此,公平的区域碳生态补偿制度是建立在科学合理核算区域碳排放责任的基础上。

现有碳生态补偿研究均基于生产责任原则(Production Based Approach, PBA)来核算区域碳排放,其因数据易得和核算步骤简易的优点而被广泛应用,但其忽视了碳排放的跨区域转移问题,在公平性上饱受争议。消费责任原则(Consumption Based Approach, CBA)从碳足迹的视角将贸易引致的碳排放纳入核算体系,能有效克服“碳泄漏”问题(Thomas & Lenzen, 2018),且有利于从消费侧角度控制全球碳排放增加(Creutzig et al., 2018)。然而消费责任原则亦存在不足:数据要求较高,测算结果的有效性不确定(Zhang et al., 2020);对高碳排放强度的生产地缺乏直接约束(Liu, 2015);抑制了进口国提升减排技术的积极性,进而降低了减排效率(Dietzenbacher et al., 2020)。鉴于生产责任原则和消费责任原则在公平和效率上均存在弊端,共担责任原则(Shared Responsibility Approach, SRA)不失为一种较为折中的核算方法(Pinero et al., 2019),共担责任即将区域生产者责任原则和消费者责任原则下界定的碳排放量按照分配系数实施加权求和,进而得出生产者和消费者共同承担的碳排放责任。其难点在于如何合理确定生产者和消费者之间的分配系数。目前主要分配方法包括:平均分配(Kondo et al., 1998; Rodrigues et al., 2006);按行业的增加值分配(Lenzen et al., 2007);碳关税税率分配(Chang, 2013);以贸易利益为分配因子实施责任分配(王育宝、何宇鹏, 2021;杨军等, 2022;王文治, 2022)。

综合已有省域碳生态补偿的研究,仍存在下述改进之处:首先,针对现有生产责任原则和消费责任原则存在的缺陷和争议,以共担责任原则来划分省域碳排放责任更体现公平性。其次,在“30·60”目标下,省域碳生态补偿需近远期相结合。最后,应将省域碳责任补偿和碳汇补偿相结合,同时纳入省域碳生态补偿。本文主要创新贡献在于:第一,在碳排放责任共担的基础上,将碳责任补偿纳入省域碳生态补偿,创新构建远期绝对碳生态补偿方案和近期相对碳生态补偿方案。第二,分别从碳中和补偿、碳责任补偿和支付能力补偿三个层面实施省域间碳生态补偿,体现了目标与责任兼顾,公平与效率结合的特征。第三,通过构建省域生态安全指数和评级标准,明确省域碳生态补偿优先级和省域碳生态补偿试点地区,分步骤推进省域碳生态补偿。

二、测算方法和数据处理

(一)共担责任原则下省域碳生态补偿设计思路

根据生态足迹理论,碳排放体现了区域经济发展对生态的需求水平,碳汇反映了区域生态供给能力,供需平衡即实现碳中和。当生态供需失衡,区域碳排放超过碳汇时,按照“污染者付费”原则,该区域应向受损的其他区域支付生态补偿,反之则应获得生态补偿。设计思路如下(如图1所示):首先,省域碳排放核算采用相对公平的共担责任原则,根据MRIO模型的测算原理,省域消费侧碳排放=省域生产侧碳排放-需求引致的省域间净碳转移量(即:省域商品流出隐含碳-省域商品流入隐含碳),省域共担责任碳排放=省域消费侧碳排放+分配因子 \times 需求引致的省域间净碳转移量。其次,省域碳汇核算涵盖了8类地表和14种耕地农作物的年度碳汇量。再次,基于省域碳排放和碳汇核算结果,测度省域生态安全指数并划分生态安全评级,明确省域生态安全风险和碳生态补偿优先级。最后,将共担责任原则下的碳责任补偿嵌入省域碳生态补偿,并充分考虑省域经济发展水平和支付能力差异后,设计了绝对和相对两套省域碳生态补偿方案,通过公平的碳生态补偿来实现省域间经济和环境的协调发展,积极稳妥推进碳中和。具体数理测算过程如下文所示。

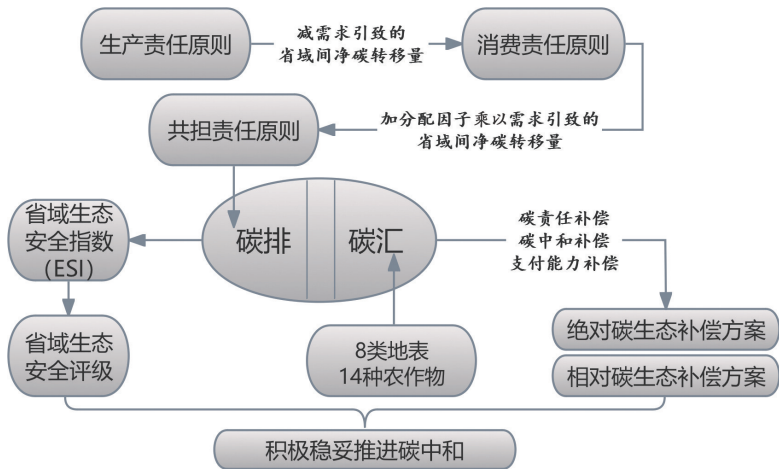


图1 共担责任原则下省域碳生态补偿设计思路

(二)省域碳排放责任共担核算方法

根据里昂惕夫投入产出模型(Leontief, 1974),中国 n 个省域 m 个行业之间行向的投入产出关系如式(1)所示。

$$E = F \times X = F \times (I - A)^{-1} \times (Y + EX + \varepsilon) \quad (1)$$

其中, E 为省域间碳排放关系矩阵($nm \times n$ 阶矩阵), 其行向加总表示各省域的生产侧碳排放, 即 $E_{PBA}^i = \sum_{j=1}^n E^{ij}$ (以省域 i 为例, 下同), 列向加总表示各省域的消费侧碳排放, 即 $E_{CBA}^i = \sum_{j=1}^n E^{ji}$ 。 F 为各省域碳排放系数对角矩阵($nm \times nm$ 阶矩阵)。 X 为各省域分行业的总产出关系矩阵($nm \times n$ 阶矩阵), 行向加总 $X^i = \sum_{j=1}^n X^{ij}$ 表示省域 i 各行业的总产出; $(I-A)^{-1}$ 为省域间中间品部门完全消耗系数矩阵($nm \times nm$ 阶矩阵); Y 表示各省域最终品消费矩阵($nm \times n$ 阶矩阵), 矩阵中元素 Y^{ij} 表示从省域 i 各行业投入省域 j 各行业的最终品($m \times 1$ 阶矩阵); EX 表示各省域分行业的出口对角矩阵($nm \times n$ 阶矩阵); ε 为误差项对角矩阵($nm \times n$ 阶矩阵)^①。

进一步, 借鉴王文治等(2023)研究, 首先计算省域最终品需求、出口和误差项引致的双边增加值流动, 如式(2)所示。

$$V = v \times B \times \tilde{Y} \quad (2)$$

式(2)中, 省域间双边增加值流动矩阵 V 中元素 V^{ij} 表示省域 i 各行业商品流出省域 j 各行业中包含的省域 i 的增加值, 反之则为 V^{ji} ; 对角矩阵 v 中元素表示各省域分行业单位产出增加值。 \tilde{Y} 为式(1)中省域最终品消费矩阵 Y 、省域出口对角矩阵 EX 和省域误差项对角矩阵 ε 之和。根据 Kondo 等(1998)提出的“受益原则”, 省域 i 和省域 j 之间的双边分配因子 $\theta^{ij} = \frac{V^{ij}}{V^{ij} + V^{ji}}$, 即省域 j 最终需求引致省域 i 商品流出隐含增加值占全部两省域间商品流动隐含增加值的比重, θ^{ij} 越高表明两省域双边商品流动中隐含的省域 i 增加值占比越高(省域 i 获取了越高的贸易利益), 按照“受益原则”应分配越多碳排放责任。通过省域间两两分配, 省域 i 在责任共担原则下界定的碳排放可由式(3)计算。

$$SRA^i = E^{ii} + \sum_{j \neq i}^n (E^{ji} + \theta^{ij} \times T^{ij}) = CBA^i + \sum_{j \neq i}^n \theta^{ij} \times T^{ij} \quad (3)$$

式(3)中, E^{ii} 为省域 i 最终需求、出口和误差项引致的本省域碳排放, E^{ji} 表示省域 i 最终需求、出口和误差项引致的省域 j 碳排放, $T^{ij} = E^{ij} - E^{ji}$, 表示省域 i 净碳转移量, 大于0表示省域 i 净碳流入, 小于0表示省域 i 净碳流出。极端情况下当全部 $\theta^{ij} = 1$ ($j \neq i$), 表示省域 i 和所有其他省域的双边商品流动中, 省域 i 获得了全部贸易利益, 则责任共担后的省域 i 碳排放等于省域 i 生产侧碳排放; 反之, 当全部 $\theta^{ij} = 0$ ($j \neq i$), 责任共担后的省域 i 碳排放等于省域 i 消

①误差项是为了平衡国内省域间投入产出数据, 没有具体的经济含义。为了测算数据的完整, 论文将误差项所引致的碳排放也纳入了核算体系。

费侧碳排放^①。根据式(3)定义可以看出,各省域责任共担后的碳排放量将介于其生产侧碳排放和消费侧碳排放之间,体现了责任共担的思想。

(三)省域碳汇核算

陆地生态系统中,森林是最主要的碳储存库,草地的储碳能力也很大,耕地碳汇包括农作物碳吸收,水域及水生生物也可吸收一部分碳。区域碳汇量(CS)的核算公式如式(4)所示:

$$CS = \sum_m S_m \times A_m + \sum_L Q_L \times (1 - P_L) \times \frac{Y_L}{H_L} \quad (4)$$

其中,下标 m 表示不同类型的地表,包括林地、园地、草地、河流、湖泊、沼泽、近海与海岸; S 为特定类型地表单位面积的碳吸收量(吴立军、田启波,2022); A 代表不同地表类型的面积;下标 L 表示农作物种类(拟定14种); Q 为耕地农作物的年产量; Y 表示生长单位产量农作物有机质(干重)的碳吸收量(陈罗焯等,2016); P 代表农作物的含水率(曹改改,2022); H 为农作物的经济系数(韩召迎等,2012)。

(四)省域生态安全评级

省域生态安全指数(Ecological Security Index, ESI),即:省域碳排放/省域碳汇(Tang et al., 2017; 吴立军、田启波,2022),能准确反映省域生态失衡程度,用以确定省域碳生态补偿优先级。定义 $ESI_i = CE_i^{SRA} / CS_i$, 其中, CE_i^{SRA} 表示省域 i 在共担责任原则下界定的碳排放量, CS_i 为省域 i 的碳汇量,该指数越高则省域 i 生态安全程度越低, $ESI_i = 1$ 为碳中和情景。测算年度(t_0)省域 i 生态安全评级划分标准为四个等级:

(1)非常安全,此时 $ESI_i < 1$ 。

(2)比较安全,表示 $1 < ESI_i < S_1$, 阈值 S_1 的估算方法如下:基于全国碳汇和碳排放历史数据得出碳汇和碳排放年均增长率 G_{cs} 和 G_{ce} ;按 G_{cs} 推算全国2060年碳汇量,按 G_{ce} 推算全国2030年碳达峰时的碳排放量;2060年实现碳中和需要全国2030年的碳排放量下降至全国2060年碳汇量,则可估计全国2030至2060年实现碳中和的年度碳减少率(G_{ae}),进而根据公式 $S_1 = (1 + G_{cs})^{2060-t_0} / \left[(1 + G_{ce})^{2030-t_0} \times (1 - G_{ae})^{30} \right]$, 计算2060年实现碳中和目标下的 t_0 年 ESI 阈值。

(3)不安全,即 $S_1 < ESI_i < S_2$, S_2 为按照上述增长率推算的2030年全国碳排放量和碳汇量的比值,鉴于碳汇增长率远低于碳排放增长率,2030年该比值应最高。

(4)非常不安全,表示 $ESI_i > S_2$ 时。

^①具体测算时会出现下列两种情况:一是当 $T^{ij} > 0$ 时,此时越大则省域 i 分配的碳排放量越高,体现了利益大,责任大的分配思路;二是当 $T^{ij} < 0$ 时,此时越大则省域 i 分配的碳排放量越少,与受益原则相悖,则采用反向分配因子来实施调节。

(五)省域碳生态补偿方案

基于省域碳排放和碳汇的测算结果,本文采用2021年7月16日全国碳排放权交易市场启动上线交易的首笔碳交易价格(52.8元/吨)为补偿价格,构建如下两套补偿方案。

1.绝对碳生态补偿方案

设 $\Delta CE_i = CE_i^{SRA} - CE_i^{PBA}$,表示区域*i*共担责任原则与生产责任原则下核算的碳排放量的差额。则区域*i*的碳补偿计算公式为:

$$NSC_i = (CE_i^{PBA} - CS_i + \Delta CE_i) \times P \times R_i \quad (5)$$

其中, NSC_i 为区域*i*的碳补偿额; P 为最终确定的单位碳补偿价格; R_i 为区域*i*的碳补偿系数,采用改进后的R. Pearl生长曲线(刘宜卓等,2024),同时反映不同经济发展水平和生活水平下人们的支付意愿。 R_i 核算公式为:

$$R_i = \frac{G_i}{(1 + e^{-EC_i^{-1}}) \times G_i} \quad (6)$$

其中, G_i 为*i*地区人均GDP; G_i 为研究地区内人均GDP总值; G_i/G_i 反映了不同地区的补偿能力,更能体现出地区间碳补偿的公平性; EC_i 为*i*地区恩格尔系数,恩格尔系数反映了地区经济发展水平; e 为自然常数。修正后的碳补偿测算模型能更好地体现不同经济社会发展水平下地区的支付意愿。

在该补偿方案下(方案一),区域发展将面临三个约束:一是碳中和约束,区域*i*在PBA下的实际碳排放高于碳汇时($CE_i^{PBA} - CS_i > 0$)就必须支付碳补偿费用,即碳中和补偿。二是公平效率约束,当区域*i*在SRA下的碳排放量高于PBA下的碳排放量($\Delta CE_i > 0$),表明现有PBA下核定的区域碳排放量存在低估,则该区域应向被高估的区域支付碳补偿费用,即碳责任补偿。三是支付能力约束,R. Pearl生长曲线将根据省域*i*的经济发展水平和支付意愿情况对其补偿和受偿金额进行调整,即支付能力补偿。

2.相对碳生态补偿方案

方案一在实施中存在两个问题,一是难以实现会计平衡;二是现阶段多数省域还未实现碳中和,按照方案一均需支付环境成本,对经济增长产生压力,且未能实现省域碳生态互补和平衡增长。鉴于此,方案二以区域在碳中和目标中的相对贡献来界定补偿对象。公式为:

$$NSC_i = \left(\frac{CE_i^{PBA}}{CE} - \frac{CS_i}{CS} + \frac{\Delta CE_i}{CE} + \frac{GDP_i}{GDP} - \frac{POP_i}{POP} \right) \times P \times \frac{|CE - CS|}{n} \quad (7)$$

其中,式子 $\left(\frac{CE_i^{PBA}}{CE} - \frac{CS_i}{CS} \right)$ 表示区域*i*实际碳排放(PBA)在全国碳排放的占比与其碳汇占比的差,负值表示该地区为全国碳中和作出了贡献,应获得补偿,反之应支付补偿,该补偿关系满足全域会计平衡;同理作为碳排放责任调整项,如 $\frac{\Delta CE_i}{CE} < 0$,则区域*i*实际碳排放被高估,从

公平角度讲应获得补偿,显然该项也满足全域会计平衡。 $(\frac{GDP_i}{GDP} - \frac{POP_i}{POP})$ 表示区域*i*的GDP在全国GDP的占比与其人口数量占比的差,负值表示该地区的支付能力低于全国平均水平,为减少对经济欠发达省域的环境成本压力,应对其进行支付能力补偿,该项也应满足全域会计平衡。 $\frac{|CE-CS|}{n}$ 表示在测算年度内,以全国碳排放与碳汇差绝对值计算的省域平均碳排放和碳汇差额,*n*为省域个数。

(六)数据来源和处理

鉴于国内多区域投入产出表非逐年编制,本文选取中国碳核算数据库(CEADs)公布的2012年(原始版本1)、2015年和2017年省域间投入产出表(未涉及港澳台和西藏地区数据)。各省域分行业的碳排放数据来自CEADs发布的历年省级排放清单。CEADs发布的2012年省域间投入产出表分类为30个省域和30个部门,CEADs发布的2015年和2017年的投入产出表为31个省域42个部门分类(包含西藏)。此外,CEADs发布的30个省域分行业碳排放数据为47个部门。为保证测算数据的一致性,在尽可能保留原有行业分类的基础上,本文将2012年、2015年和2017年的投入产出表与碳排放数据的行业分类实施匹配(行业匹配表可参见附表1),最终生成30个省域22个行业投入产出数据及分省域22个行业碳排放数据。

基于CNKI中国经济社会大数据研究平台,碳汇测算数据涉及31个省域^①的陆地和水域两个生态系统的面积数据。其中,陆地生态系统中的林地、园地、草地的面积数据主要来源于《中国统计年鉴》和原国家林业局公布的《第七次全国森林资源清查主要结果(2004—2008年)》。耕地数据中包含的14种农作物产量数据来源于《中国统计年鉴》和各省域统计年鉴。水域生态系统数据来源于《中国首次湿地调查(1995—2003)资料》和《第二次全国湿地资源调查(2009—2013)资料》,鉴于水域生态系统数据只有两组,缺失年份的数据使用邻近年份数据进行插值填补。

三、测算结果

(一)共担责任原则下的省域碳排放

根据式(1)和式(3),三种核算方法下2017年^②30个省域的碳排放量如图2所示。首先,2017年3种计量原则下的全国碳排放量均一致为9361.6百万吨(MT),说明本文构建的3种省域碳排放责任计量方法是合理的。其次,3种计量原则下碳排放量均较高的省域包括江苏、山

^①鉴于西藏地区碳汇数据完整,但碳排放数据缺失,进而仅分析了碳汇情况,未涉及生态安全评级和碳生态补偿内容。

^②由于篇幅有限,2012年和2015年各项指标数据测算结果未在文中一一列出,数据备索,下同。

东、广东、河北和河南,这5个省域应是碳减排的重点地区^①。其中,山东在PBA下的碳排放量最高;广东在CBA下的碳排放量最高。究其原因,PBA反映了省域内产品生产的全部碳排放,山东是重工业产品生产集中的地区,在生产责任原则下生产过程中的碳排放全部记录在生产地,因此其生产侧碳排放较高;CBA反映了省域最终品需求引致的碳排放,广东是外贸出口大省,在消费责任原则下出口引致碳排放均记录在最终品的消费地,因此其消费侧碳排放较高。最后,SRA是对现有PBA和CBA计量方法的调整,其分配方式较为折中,图2显示各省域SRA核算方法下的碳排放量介于PBA和CBA之间,体现了责任共担的思想,且降低了省域间碳排放责任分配的不平衡,有利于减少争议。鉴于此,本文的省域生态安全评级和碳生态补偿方案中涉及的碳排放核算均基于共担责任原则。

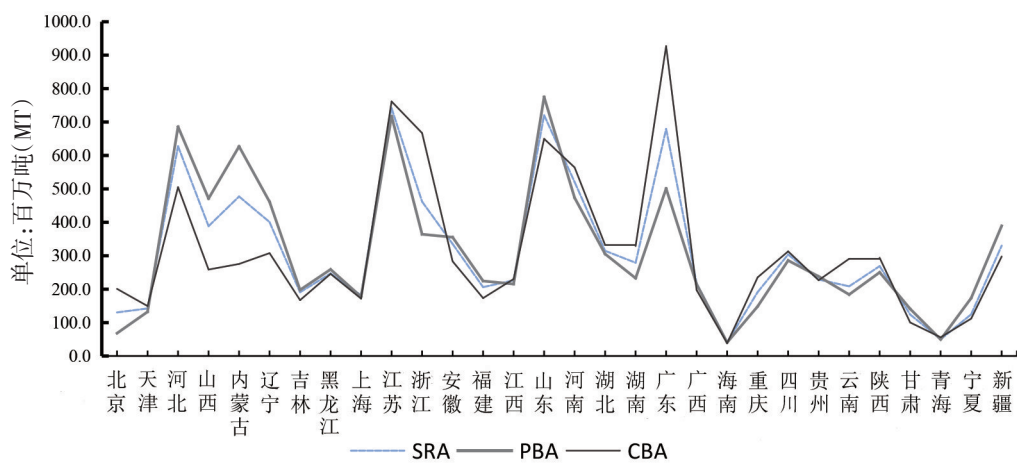


图2 2017年三种核算方法下省域的碳排放量

(二)省域碳汇核算结果

根据公式(4),各省域8类地表14种耕地农作物的年度碳汇量从2000年的29.6亿吨上升至2022年的36.8亿吨,年均增长速度约为0.98%。其中陆地碳汇占93.8%(林地碳汇占44.9%,草地碳汇占23.9%,耕地农作物碳汇占22.2%),水域碳汇仅占6.2%。2017年各省域碳汇总量和结构特征如图3所示。碳汇总量较高的省域包括:内蒙古(361.2MT)、西藏(358.4MT)、新疆(228.6MT)、黑龙江(223.6MT)、四川(213.5MT)、青海(193.0MT)、云南(170.4MT)和广西(133.2MT);相反4个直辖市和东部沿海省域的碳汇量相对较低。从碳汇结构特征来看,云南、四川、广西和黑龙江的林地碳汇占其碳汇总量的55.2%~75.5%;西藏、青海、新疆和内蒙古的草地碳汇占其碳汇总量的46.2%~67.1%;江苏、山东、河南和天津的耕地农作物碳汇占其碳汇总量的57.0%~73.2%;上海的近海与海岸碳汇量占其碳汇总量的

^①根据测算结果,历年碳排放量较高的省域均为文中列出的5个省域,其他年份的详细测算数据备案。

60.2%。总体来看,西部和东北大兴安岭地区广袤的草地和林地是我国碳汇的主要来源,通过省域间碳生态补偿方式来实现西部地区林地和草地等自然资源的碳汇生态价值,是实现2060年碳中和目标的有效途径。

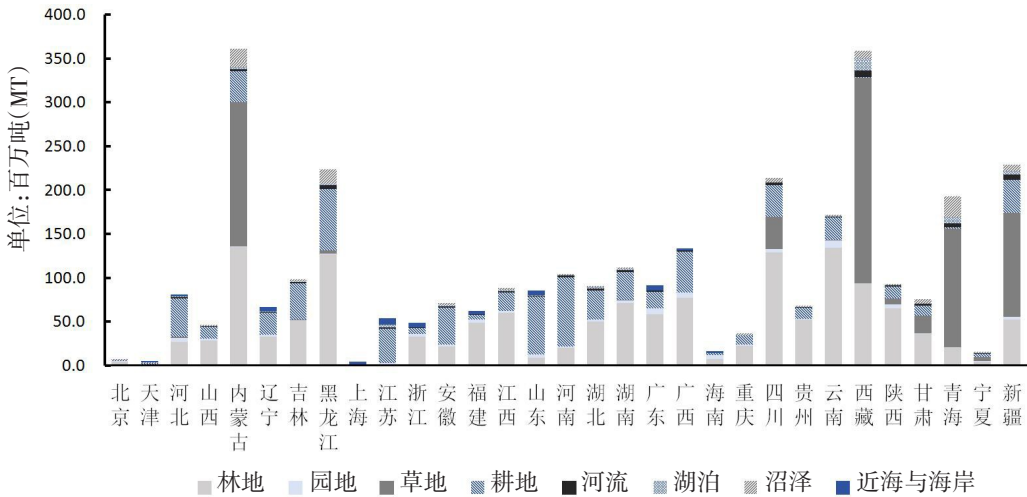


图3 2017年各省域碳汇量和结构特征

(三)省域生态安全评级

设2017年为测算年度($t_0=2017$),各省域生态安全指数和生态评级结果如表1所示。表1结果表明,2017年中国省域生态安全指数呈现从西向东逐步递增的分布特征。青海ESI值低于1,已处于碳中和情景,生态安全评级为非常安全。内蒙古、黑龙江和云南等11省域ESI值高于1但低于第一阈值2.87,表明上述省域2017年的ESI值低于2060年全国实现碳中和目标下的2017年ESI阈值,即:以上11个省域能按期实现碳中和目标,生态安全评级为比较安

表1 2017年30个省域生态安全指数和生态评级

非常安全 (ESI<1)		比较安全 (1<ESI<2.87)		不安全 (2.87<ESI<6.35)		非常不安全 (ESI>6.35)	
省域	ESI	省域	ESI	省域	ESI	省域	ESI
青海	0.29	黑龙江	1.1	陕西	2.9	广东	7.5
		云南	1.2	福建	3.3	河北	7.8
		内蒙古	1.3	贵州	3.4	山东	8.5
		四川	1.4	湖北	3.5	山西	8.7
		新疆	1.4	安徽	4.8	宁夏	8.7
		广西	1.6	河南	5.1	浙江	9.6
		甘肃	1.6	重庆	5.5	江苏	13.9
		吉林	2.0	辽宁	6.1	北京	22.8
		湖南	2.5			天津	37.0
		江西	2.6			上海	44.5
		海南	2.6				

全。陕西、福建等8个省域ESI值高于2.87但低于第二阈值6.35(全国2030年实现碳达峰时的ESI最大值),如仅靠省域自身自然资源碳汇量来抵消其碳排放增长,实现碳中和目标存在一定风险,需进一步提升8个省域的碳减排速度或人工碳汇能力。因此,其生态安全评级为不安全。天津、上海、北京等10个省域ESI值高于第二阈值,其生态安全评级为非常不安全。究其原因,部分省域在共担责任原则下核定的碳排放量较高,例如山东、河北、山西、江苏等;部分省域自然资源碳汇较低,例如3个直辖市,进而导致其ESI值较高。高ESI省域如仅靠自身自然资源碳汇量来抵消其碳排放增长,省域内实现碳中和存在较高风险,应通过与西部自然资源碳汇量较高的省域(ESI较低),以碳生态补偿的方式实现碳中和,且生态安全高风险的省域应成为省域碳生态补偿的优先试行地区。

(四)省域碳生态补偿

1.省域间绝对碳生态补偿结果

绝对碳生态补偿测算结果如表2所示,2017年多数省域碳排放高于其碳汇,因此除青海外,均需支付补偿费用。在碳责任补偿下,内蒙古、山东、山西等13个省域由于在PBA下承担了较高的碳排放责任,通过SRA责任调整后,合计可获得12.2亿元人民币的碳生态补偿;相反广东、浙江、北京等14个省域需支付碳责任补偿金合计17.6亿元人民币,由于各省域的支付

表22017年省域间绝对碳生态补偿结果(单位:亿元)

省域	总补偿	碳责任补偿	碳中和补偿	省域	总补偿	碳责任补偿	碳中和补偿
北京	6.3	3.1	3.2	河南	7.4	0.8	6.6
天津	6.2	0.4	5.8	湖北	5.1	0.2	4.9
河北	9.6	-1.0	10.6	湖南	3.2	0.9	2.3
山西	5.6	-1.3	6.9	广东	17.9	5.4	12.5
内蒙古	2.8	-3.7	6.5	广西	1.2	0.0	1.2
辽宁	6.9	-1.2	8.1	海南	0.4	0.0	0.4
吉林	1.9	-0.2	2.1	重庆	3.7	1.0	2.7
黑龙江	0.4	-0.2	0.6	四川	1.5	0.3	1.2
上海	8.7	0.2	8.5	贵州	2.4	-0.1	2.5
江苏	28.2	1.0	27.2	云南	0.5	0.3	0.2
浙江	14.5	3.4	11.1	陕西	3.9	0.4	3.5
安徽	4.4	-0.3	4.7	甘肃	0.5	-0.2	0.7
福建	4.4	-0.6	5.0	青海	-2.4	0.0	-2.4
江西	2.3	0.2	2.1	宁夏	2.2	-0.9	3.1
山东	17.8	-1.5	19.3	新疆	1.8	-1.0	2.8
				合计	169.3	5.4	163.9

能力和支付意愿存在差异,碳责任补偿未能实现全域会计平衡,全国合计碳责任补偿5.4亿元人民币。在经过省域支付能力和支付意愿调整后,江苏、山东、广东、浙江和河北在碳中和目标下需支付的补偿金均在10亿元人民币以上,全国合计163.9亿元人民币。总体上2017年30个省域在碳中和目标下,经碳责任调整后,累计碳补偿金额为169.3亿元人民币。综上,与以往研究类似,现阶段多数省域碳排放明显高于碳汇(万伦来等,2020;吴立军、田启波,2022),碳补偿金额可视为各省域需要提交的碳生态补偿罚金,然而经过碳责任补偿后,河北、山西、内蒙古、辽宁和山东等省域的生态补偿罚金大幅度缩减。这类省域多属于能源密集和重工业生产地区,承担了较高的碳排放净流入(王文治,2022;邢贞成,2023),在责任共担纳入碳生态补偿后,其承担的生态补偿罚金显著降低,体现了碳责任分配的公平性。鉴于2030年之前,多数省域碳汇和碳排放之间的缺口仍将不断扩大,提交罚金将产生较大的环境成本压力。因此,建议绝对碳生态补偿方案在2030年后择机实施,可视为远期区域碳生态补偿方案。

2.省域间相对碳生态补偿结果

相对碳生态补偿测算结果如表3所示,相对碳生态补偿方案中合计金额为0,实现了全域会计平衡。以SRA为省域碳排放责任界定标准,2017年内蒙古、山西、辽宁等13个省域合计获得6.7亿元人民币碳责任补偿,支付方主要为广东、浙江和北京。在碳中和目标下,青海、内蒙古、黑龙江等13个省域合计获得38亿元人民币的碳中和补偿,支付方主要为江苏、山东、河北和山西。河南、四川、云南等20个省域合计获得17.2亿元人民币的支付能力补偿,支付方

表3 2017年省域间相对碳生态补偿结果 (单位:亿元)

省域	总补偿	碳责任补偿	碳中和补偿	支付能力补偿	省域	总补偿	碳责任补偿	碳中和补偿	支付能力补偿
北京	3.3	0.8	0.6	1.9	河南	0.5	0.5	1.7	-1.7
天津	2.6	0.1	1.4	1.1	湖北	0.2	0.1	0.2	-0.1
河北	2.7	-0.7	4.9	-1.5	湖南	-1.9	0.5	-1.4	-1.0
山西	1.9	-0.9	3.7	-0.9	广东	7.0	2.0	2.4	2.6
内蒙古	-7.7	-1.7	-6.1	0.1	广西	-3.8	0.0	-2.4	-1.4
辽宁	1.7	-0.8	2.9	-0.4	海南	-0.3	0.0	-0.1	-0.2
吉林	-1.6	-0.1	-1.3	-0.2	重庆	1.0	0.5	0.4	0.1
黑龙江	-6.2	-0.1	-5.2	-0.9	四川	-6.1	0.2	-4.6	-1.7
上海	3.9	0.0	1.9	2.0	贵州	-0.9	-0.1	0.3	-1.1
江苏	11.2	0.3	6.2	4.7	云南	-5.5	0.3	-4.1	-1.7
浙江	5.7	1.1	2.4	2.2	陕西	-0.5	0.2	-0.5	-0.2
安徽	-0.1	-0.2	1.5	-1.4	甘肃	-2.5	-0.2	-1.2	-1.1
福建	1.1	-0.2	0.3	1.0	青海	-6.6	0.0	-6.5	-0.1
江西	-1.6	0.1	-0.7	-1.0	宁夏	1.0	-0.4	1.5	-0.1
山东	6.6	-0.6	5.7	1.5	新疆	-5.1	-0.7	-3.9	-0.5
					合计	0.0	0.0	0.0	0.0

主要为江苏、广东和浙江。合并碳责任、碳中和以及支付能力补偿后,内蒙古、青海和黑龙江等15个省域将累计获得50.4亿元人民币的碳生态补偿金,支付方主要为江苏、广东和山东。此外,华北地区、东部沿海和南部沿海省域由于人均GDP较高,支付能力相对较强,需要向中西部地区和东北地区省域进行支付能力补偿,降低其环境治理成本压力。相对方案一,方案二形成了省域间的碳生态补偿,碳汇高和碳排放责任被高估的省域(内蒙古)从碳排放高和碳排放责任被低估的省域那里获得补偿金,部分省域生态价值得以实现,部分碳排放较高省域支付了环境成本。从补偿方向来看,多数东部经济发达省域需要向中西部经济欠发达省域实施生态补偿,有益于省域经济的平衡增长。此外,全域会计平衡的特征易于形成市场化的碳生态补偿交易制度。

四、结论与政策建议

本文在共担责任原则下公平界定省域碳排放,进一步基于省域碳汇核算结果,构建了省域生态安全指数、生态安全评级标准、远期绝对碳生态补偿方案和近期相对碳生态补偿方案。研究结论如下:首先,共担责任原则下的省域碳排放量介于生产责任原则和消费责任原则之间,降低了省域间碳排放责任分配的不平衡,有利于减少争议,且折中的分配结果更体现公平。其次,我国西部和东北大兴安岭地区广袤的草地和林地是我国碳汇的主要来源,生态安全风险较低;相反,华北、东部和南部沿海经济发达地区的碳汇总量较低,生态安全风险较高,靠自身碳汇增长难以实现碳抵消。因此,跨省域碳生态补偿能有效缓解经济发达省域的高生态风险,实现西部地区林地和草地等自然资源的碳汇生态价值,缩减省域经济发展差异。最后,相对碳生态补偿方案易于形成市场化的碳生态补偿交易制度且补偿成本相对较低,适合在碳达峰前实施。绝对碳生态补偿方案在碳达峰前涉及的罚金将产生较高的环境成本,对省域经济增长产生压力,更适合在碳达峰后择机实施。从补偿方向看,多数经济发达省域需要向经济欠发达省域实施生态补偿,将有利于省域间经济和环境的协调发展。综上所述,主要政策建议如下:

第一,以共担责任原则为基准,将碳责任补偿嵌入碳生态补偿。随着碳排放双控逐渐成为地区碳减排的主要约束性指标,现有生产责任原则核算方法高估了部分省域的碳排放责任,增加其环境成本和减排压力。建议基于共担责任原则,一方面鼓励在生产责任原则核算方法下,被低估碳排放责任的省域,通过财政横向转移支付,给予被高估碳排放责任省域一定的碳责任补偿金,降低其在碳排放双控下的减排压力;另一方面对自然碳汇高于碳排放的省域实施碳中和补偿,推进其生态产品价值实现。将碳责任补偿、碳中和补偿和省域经济发展水平相融合,通过公平的碳生态补偿实现省域间经济和环境的协调发展。此外,碳达峰之前可优先选择相对碳生态补偿方案,构建市场化的碳生态补偿体系;碳达峰后择机实施绝对碳

生态补偿方案,通过激励和惩罚机制加速碳中和实现。

第二,因地制宜深挖碳汇增量潜力。实现碳中和目标需要在控制碳排放的基础上,不断扩大生态系统的碳汇增量。生态功能重点地区,如内蒙古、黑龙江、青海、云南等省域,需持续增加森林面积和蓄积量,加强草原生态保护修复,提升自然碳汇增量。沿海地区需注重海洋生态系统的保护和修复,提升红树林、海草床和盐沼等固碳能力。农业重点产地,如河南,可积极开展耕地质量提升行动,提升生态农业碳汇。部分东部和南部经济发达地区,自然碳汇资源不足,则应侧重碳汇技术投入,例如碳捕集、利用与封存(CCUS)和直接空气碳捕集(DAC)技术等,不断提升人工碳汇增量。

第三,建立碳生态补偿试点区,先试先行探索跨省域碳生态补偿经验。参照长三角生态绿色一体化发展经验,建议将地理位置接壤、双边碳转移较高和生态安全风险较高的省域合并建立碳生态补偿合作试点区。例如京津冀晋蒙地区、粤桂湘地区、成渝地区等,试点区域内可打破省域间的行政壁垒,通过财政转移支付形式,积极探索跨省域实施碳生态补偿的可行性和具体方式。此外,试点地区可合作创建高效准确的碳排放和碳汇核算体系,例如运用人工智能、区块链、云计算和大数据等数字技术实时追踪、记录和共享区域碳排放和碳汇量,为区域碳生态补偿提供数据支持。

附录：

附表1 CEADs 碳排放和投入产出表的行业匹配表

行业 编号	CEADs 公布的 CO ₂ 排放行业分类	CEADs (2015, 2017) 的 IO 表 行业分类	CEADs (2012) 的 IO 表行 业分类
1	Farming, Forestry, Animal Husbandry, Fishery and Water Conservancy	农林牧渔产品和服务	农林牧渔业
2	Coal Mining and Dressing Petroleum and Natural Gas Extraction Ferrous Metals Mining and Dressing Nonferrous Metals Mining and Dressing Nonmetal Minerals Mining and Dressing Other Minerals Mining and Dressing Logging and Transport of Wood and Bamboo	煤炭采选产品 石油和天然气开采产品 金属矿采选产品 非金属矿和其他矿采选产 品	煤炭开采和洗选业 石油和天然气开采业 金属矿采选业 非金属矿及其他矿采选 业
3	Food Processing Food Production Beverage Production Tobacco Processing	食品和烟草	食品制造及烟草加工业

续附表1 CEADs碳排放和投入产出表的行业匹配表

行业 编号	CEADs 公布的 CO ₂ 排放行业分类	CEADs(2015,2017)的 IO 表 行业分类	CEADs(2012)的 IO 表行 业分类
4	Textile Industry	纺织品	纺织业
5	Garments and Other Fiber Products Leather, Furs, Down and Related Products	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业
6	Timber Processing, Bamboo, Cane, Palm Fiber & Straw Products Furniture Manufacturing	木材加工品和家具	木材加工及家具制造业
7	Papermaking and Paper Products Printing and Record Medium Reproduction Cultural, Educational and Sports Articles	造纸印刷和文教体育用品	造纸印刷及文教体育用品制造业
8	Petroleum Processing and Coking	石油、炼焦产品和核燃料加工品	石油加工、炼焦及核燃料加工业
9	Raw Chemical Materials and Chemical Products Medical and Pharmaceutical Products Chemical Fiber Rubber Products Plastic Products	化学产品	化学工业
10	Nonmetal Mineral Products	非金属矿物制品	非金属矿物制品业
11	Smelting and Pressing of Ferrous Metals Smelting and Pressing of Nonferrous Metals	金属冶炼和压延加工品	金属冶炼及压延加工业
12	Metal Products	金属制品	金属制品业
13	Ordinary Machinery Equipment for Special Purposes	通用设备 专用设备	通用、专用设备制造业
14	Transportation Equipment	交通运输设备	交通运输设备制造业
15	Electric Equipment and Machinery Electronic and Telecommunications Equipment Instruments, Meters, Cultural and Office Machinery	电气机械和器材 通信设备、计算机和其他电子设备 仪器仪表	电气机械及器材制造业 通信设备、计算机及其他电子设备制造业 仪器仪表及文化办公用机械制造业
16	Other Manufacturing Industry Scrap and Waste	其他制造产品 金属制品、机械和设备修理服务	其他制造业
17	Production and Supply of Electric Power, Steam and Hot Water	电力、热力的生产和供应	电力、热力的生产和供应业
18	Production and Supply of Gas Production and Supply of Tap Water	燃气生产和供应 水的生产和供应	燃气及水的生产与供应业
19	Construction	建筑	建筑业

续附表 1 CEADs 碳排放和投入产出表的行业匹配表

行业 编号	CEADs 公布的 CO ₂ 排放行业分类	CEADs(2015,2017)的 IO 表 行业分类	CEADs(2012)的 IO 表行 业分类
20	Transportation, Storage, Post and Telecommunication Services	交通运输、仓储和邮政	交通运输及仓储业
21	Wholesale, Retail Trade and Catering Services	批发和零售 住宿和餐饮	批发零售业 住宿餐饮业
22	Others	信息传输、软件和信息技术 服务 金融 房地产 租赁和商务服务 科学研究 技术服务 水利、环境和公共设施管理 居民服务、修理和其他服务 教育 卫生和社会工作 文化、体育和娱乐 公共管理、社会保障和社会 组织	租赁和商业服务业 研究与试验发展业 其他服务业

参考文献：

[1] 曹改改. 基于碳收支核算的中国省域碳补偿问题研究[D]. 成都:西南财经大学, 2022.

[2] 曹俊文,陶强强. 长江经济带农业碳补偿修正测算及分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(04): 693-698.

[3] 陈罗烨,薛领,雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(04): 596-607.

[4] 陈儒,姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(04): 87-97.

[5] 丁晨希,王立国. 自愿机制下森林旅游地经营者碳补偿意愿的影响因素研究——基于江西省 10 个森林公园 464 份样本的调查分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(01): 104-113.

[6] 韩召迎,孟亚利,徐娇,等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(05): 1034-1041.

[7] 郇庆治. 21 世纪以来的西方生态资本主义理论[J]. 马克思主义与现实, 2013(02): 108-128.

[8] 李国平,刘生胜. 中国生态补偿 40 年:政策演进与理论逻辑[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2018, 38(06): 101-112.

[9] 刘宜卓,石悦泽,荆克迪. “双碳”目标下黄河流域九省区横向区域碳补偿机制构建研究[J]. 生态经济, 2024, 40(01): 29-37.

[10] 牛志伟,邹昭晞. 农业生态补偿的理论与方法——基于生态系统与生态价值一致性补偿标准模型[J]. 管理世界, 2019, 35(11): 133-143.

[11] 万伦来,林春鑫,陈艺. 基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2572-2583.

- [12] 汪惠青,单钰理.生态补偿在我国大气污染治理中的应用及启示[J].环境经济研究,2020,5(02):111-128.
- [13] 王立国,丁晨希,彭剑峰,等.森林公园旅游经营者碳补偿意愿的影响因素比较[J].经济地理,2020,40(05):230-238.
- [14] 王文治,胡雍,张晓宇.中国省域碳排放责任分配方法比较与碳补偿设计[J].资源科学,2023,45(10):1913-1930.
- [15] 王文治.我国省域消费侧碳排放责任分配的再测算——基于责任共担和技术补偿的视角[J].统计研究,2022,39(6):3-16.
- [16] 王育宝,何宇鹏.增加值视角下中国省域净碳转移权责分配[J].中国人口·资源与环境,2021,31(1):15-25.
- [17] 吴昊玥,何艳秋,陈文宽,等.中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究——基于空间 Durbin 模型[J].农业技术经济,2020(3):110-122.
- [18] 吴立军,田启波.碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J].地理研究,2022,41(01):149-166.
- [19] 邢贞成.中国省际贸易隐含碳排放测算及跨区域补偿机制[J].环境经济研究,2023,8(01):84-99.
- [20] 杨军,杨泽,丛建辉,等.责任和收益匹配原则下中国省域碳排放责任共担方案优化[J].资源科学,2022,44(09):1745-1758.
- [21] 于金娜,姚顺波.基于碳汇效益视角的最优退耕还林补贴标准研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(07):34-39.
- [22] 张永泽,朱雨萌,张诗雨,等.关于构建城市间跨区域碳减排合作机制的思考[J].环境保护,2022,50(Z1):55-59.
- [23] 赵荣钦,刘英,李宇翔,等.区域碳补偿研究综述:机制、模式及政策建议[J].地域研究与开发,2015,34(05):116-120.
- [24] 赵荣钦,刘英,马林,等.基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J].自然资源学报,2016,31(10):1675-1687.
- [25] Carpenter, S. R., H. A. Mooney, J. Agard, et al. Science for Managing Ecosystem Services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [26] Chang, N. Sharing Responsibility for Carbon Dioxide Emissions: A Perspective on Border Tax Adjustments[J]. Energy Policy, 2013, 59: 850 - 856.
- [27] Creutzig, F., J. Roy, W. F. Lamb, et al. Towards Demand-Side Solutions for Mitigating Climate Change[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 260-263.
- [28] Dietzenbacher, E., I. Cazcarro, I. Arto. Towards a More Effective Climate Policy on International Trade[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1130.
- [29] Engel, S., S. Pagiola, S. Wunder. Designing Payments for Environmental Services in Theory and Practice: An Overview of the Issues[J]. Ecological Economics, 2008, 65(4): 663-674.
- [30] Huan, Q. Z. Criticism of the Logic of the Ecological Imperialism of "Carbon Politics" and Its Transcendence[J]. Social Sciences in China, 2017, 38(02): 76-94.
- [31] Kondo, Y., Y. Moriguchi, H. Shimizu. CO₂ Emissions in Japan: Influences of Imports and Exports[J]. Applied Energy, 1998, 59(2): 163-174.
- [32] Lenzen, M., J. Murray, F. Sack, et al. Shared Producer and Consumer Responsibility — Theory and Practice[J]. Ecological Economics, 2007, 61(1): 27-42.

- [33] Leontief, W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input–Output Approach: A Reply[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1974, 56(1): 109–110.
- [34] Liu, L. A Critical Examination of the Consumption–Based Accounting Approach: Has the Blaming of Consumers Gone Too Far?[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2015, 6(1): 1–8.
- [35] Pinero, P., M. Bruckner, H. Wieland. The Raw Material Basis of Global Value Chains: Allocating Environmental Responsibility Based on Value Generation[J]. *Economic Systems Research*, 2019, 31 (2): 206–227.
- [36] Rodrigues, J., T. Domingos, S. Giljum. Designing an Indicator of Environmental Responsibility[J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(3): 256–266.
- [37] Tang, C. R., C. P. Lu, Q. Yang. Dynamic Evolution and Driving Forces of Ecological Security in the Traditional Industrial Area of Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 103–111.
- [38] Thomas, W., M. Lenzen, Environmental and Social Footprints of International Trade[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4): 314–321.
- [39] Xiong, C. H., D. G. Yang, J. W. Huo, et al. Agricultural Net Carbon Effect and Agricultural Carbon Sink Compensation Mechanism in Hotan Prefecture[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(1): 365–373.
- [40] Yu, B., L. Y. Xu, Z. F. Yang. Ecological Compensation for Inundated Habitats in Hydropower Developments Based on Carbon Stock Balance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114(7): 334 – 342.
- [41] Yu, J. N., S. B. Yao, B. S. Zhang. Designing Afforestation Subsidies That Account for the Benefits of Carbon Sequestration: A Case Study Using Data from China's Loess Plateau[J]. *Journal of Forest Economics*, 2014, 20(1): 65–76.
- [42] Zhang, Z., Z. X. Zhang, K. F. Zhu. Allocating Carbon Responsibility: The Role of Spatial Production Fragmentation[J]. *Energy Economics*, 2020, 87: 104491.

China's Provincial Carbon Ecological Compensation under Carbon Neutrality Goal: A Study Based on the Perspective of Shared Responsibility

Wang Wenzhi, Zhang Xiaoyu

(School of Economics, Tianjin Normal University)

Abstract: Regional carbon eco-compensation is an effective way to achieve China's carbon neutrality goal, and its prerequisite is the reasonable definition of regional carbon emissions and sinks. Compared with the accounting of carbon sinks, the definition of regional carbon emission responsibility is more complicated due to the problem of carbon transfer, so the construction of a fair regional carbon eco-compensation scheme needs to define the responsibility of regional carbon emissions fairly first. Based on the MRIO model, this paper defines the provincial carbon emissions under the principle of shared responsibility, and combines the results of carbon sink accounting to embed the provincial carbon emissions under the principle of shared responsibility into the provincial ecological security rating and the

absolute relative carbon eco-compensation scheme. The results of the study show that the principle of shared responsibility embodies the allocation idea of "greater benefits, greater responsibility", and is more eclectic than the principles of production responsibility and consumption responsibility. China's provincial ecological security index shows the characteristic of "high in the east and low in the west", and it is difficult for the eastern provinces to achieve carbon offset through the development of their own carbon sink industries, and they need to achieve carbon neutralization through carbon eco-compensation with the western provinces that are rich in carbon sink resources. The inter-provincial absolute and relative carbon eco-compensation scheme combines carbon liability compensation and carbon neutrality compensation, and the provinces with overestimated carbon emission responsibilities under the production responsibility principle, and the provinces with rich carbon sinks and less developed economies usually receive carbon compensation, and the distribution scheme reflects the characteristics of balancing goals and responsibilities, and combining fairness and efficiency. The conclusion of this paper provides a theoretical basis and policy reference for China to achieve the goal of carbon neutrality.

Keywords: Carbon Emission Responsibility; Carbon Ecological Compensation; Carbon Sink; Dual Control of Carbon Emissions

JEL Classification: Q26, Q56, Q58

(责任编辑:朱静静)