

# 中国农业部门环境足迹区域间转移的溢出-反馈效应

胡静茹<sup>1,2</sup> 黄凯<sup>1,†</sup> 陈盈<sup>1</sup>

1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438;

† 通信作者, E-mail: huangkai@bjfu.edu.cn

**摘要** 以中国七大区域的农业部门为研究对象, 引入水足迹-碳足迹-土地足迹为代表的环境足迹来表征其资源环境影响, 从溢出-反馈的新视角分析区域间的资源环境压力转移。首先在区域间投入产出模型的基础上分解出溢出-反馈效应模型, 并将其拓展至资源环境领域, 构建耦合环境足迹的溢出-反馈效应模型, 从区际双向影响的角度评价农业部门的资源环境压力转移。研究表明, 2007—2012年七大区域的农业部门区际水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出-反馈效应空间差别较大; 反馈效应较为显著, 不应忽略。在各区域农业部门反馈占溢出的比例中, 华北区域最大, 均大于31.3%; 华东、华南和中南区域的比例也较大, 均大于10.7%。考虑到我国农业部门现有的区际资源可使用量和需求量与区域经济发展水平并不匹配, 应在一定程度上改善贸易结构, 建立区域一体化贸易模式。

**关键词** 环境足迹; 溢出-反馈效应; 农业部门; 中国

## The Spillover-Feedback Effect of Agricultural Sector's Environmental Footprints Interregional Transfer in China

HU Jingru<sup>1,2</sup>, HUANG Kai<sup>1,†</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438;

† Corresponding author, E-mail: huangkai@bjfu.edu.cn

**Abstract** This study takes seven regional agricultural sectors in China as the research object, and introduces water footprint (WF), carbon footprint (CF) and land footprint (LF) to analyze the spillover-feedback effect of these environmental footprints to characterize their resource and environment impacts. Based on the inter-regional input-output model, this paper first decomposed the spillover-feedback effects model, extended it to the environmental field, constructed the spillover-feedback effects model coupled with environmental footprints, and evaluated the transfer of resource and environment pressure in the agricultural sector from the perspective of inter-regional two-way impacts. The results show that the spillover effects and feedback effects of WF, CF and LF in seven regions of China's agriculture sectors varied greatly in spatial level in 2007–2012. The feedback effects of WF, CF, and LF were more significant and should not be ignored. Through further analysis of the ratio of feedback effect to spillover effect of each region's Agricultural Sector, it was found that the ratio of feedback effect to spillover effect of North (NO) region's agricultural sector was the largest, all more than 31.3%. The ratio of feedback effect to spillover effect of East (EA), South (SO) and Central South (CS) regions' Agricultural Sectors were also larger, all more than 10.7%. Finally, it was pointed out that the current interregional available resources in China's Agriculture Sector did not match the demand and the level of regional economic development, so to some extent, the current trade structure should be improved to support agricultural sustainable development.

**Key words** environmental footprint; spillover-feedback effect; agricultural sector; China

作为世界上最大的水资源消耗和碳排放国之一,中国在水、土地和碳排放等方面面临的挑战正在加剧。2018年中国人均水资源占有量为1975.6 m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>,仅为世界人均水平的25%。根据《2018全球碳预算》<sup>[2]</sup>,作为全球最大的能源消费国和碳排放国,2017年中国对全球二氧化碳排放的贡献率为27%。此外,中国不同区域的资源使用量和需求量与区域经济发展水平极不匹配<sup>[3]</sup>,资源分布不均衡也使中国资源短缺问题进一步加剧。农业部门的首要功能是为人类提供赖以生存的粮食<sup>[4]</sup>。我国是农业大国,农业部门是用水量最大、土地利用最多的部门<sup>[5-6]</sup>,也是全球温室气体重要排放源<sup>[7-8]</sup>。因此,研究中国区域内农业发展和区际贸易对资源环境的胁迫影响,具有重要的理论和现实意义。

为了有效地评估区域产业发展和区际贸易对资源环境的胁迫影响,本文引入环境足迹这一概念。环境足迹是表征人类活动的资源消费和环境影响的指标<sup>[9]</sup>。作为生态经济学研究的重要对象和手段,以碳足迹和水足迹等为代表的环境足迹类指标为科学度量人类活动过程中排放的温室气体、人类消费的产品和服务所消耗的总水资源量提供了参考。本文用水足迹(water footprint, WF)<sup>[10]</sup>表征基于最终需求所使用的淡水资源量,用碳足迹(carbon footprint, CF)<sup>[11]</sup>表征基于能源消耗而排放的温室气体的总量,用土地足迹(land footprint, LF)<sup>[12]</sup>表征基于最终需求所利用的土地面积,包括与商品、服务和投资相关的土地使用。

在经济领域,区域间的相互作用机制主要通过溢出-反馈效应来体现<sup>[13]</sup>。溢出效应一般指一地区经济的发展对另一地区经济发展的单向影响,反馈效应则表示一地区经济的变化在对另一地区经济产生影响的同时,后者经济的变化反过来对该地区经济产生的影响<sup>[14]</sup>,相当于第二次溢出效应。溢出和反馈效应最早由Miller<sup>[15]</sup>提出,后逐渐得到完善和发展<sup>[15-18]</sup>。近年来,中国不少学者也基于溢出-反馈效应对区域间经济联系进行分析和研究。例如,潘文卿<sup>[13]</sup>比较了中国沿海与内陆间经济影响的溢出-反馈效应;吴福象等<sup>[19]</sup>研究了中国东、中、西三大区域的经济溢出-反馈效应。如果将这一概念扩展到环境领域,对于两区域的封闭体系来说,当区域 $r$ 享有高水平的经济增长时,对区域 $s$ 的产品需求也会增加,从而推动区域 $s$ 经济增长,并产生更多的资源消耗。也就是说,环境压力从区域 $r$ 溢

出到区域 $s$ 。与此同时,区域 $s$ 的经济增长也会反过来推动区域 $r$ 的经济增长,并对区域 $r$ 产生环境压力,即环境压力从区域 $r$ 通过区域 $s$ 又反馈到区域 $r$ 本身。

为了更好地分析区域特征和产业部门间的影响,Isard<sup>[20]</sup>提出区域间投入产出(IRIO)法,Wiedmann<sup>[21]</sup>提出简化方法——多区域投入产出(MRIO)法。目前,在资源和环境领域,IRIO和MRIO是研究区际环境压力转移的常用方法,但现有的研究大都从单向影响的角度,只涉及溢出效应<sup>[22-24]</sup>。从全球范围来看,对溢出-反馈的研究仍然集中于经济领域,涉及资源环境领域的研究较少,且主要聚焦于碳排放的区域转移。例如,Li等<sup>[25]</sup>对首都城市群碳排放的溢出和反馈效应进行了核算,Zhang<sup>[26]</sup>对中国东部、中部和西部碳排放的溢出和反馈效应进行了评价,Ning等<sup>[27]</sup>测算了中国八大区域碳排放的溢出和反馈效应,Wang等<sup>[28]</sup>分析了“一带一路”沿线国家的碳转移情况。此外,少数学者将溢出和反馈模型应用于集成环境足迹和虚拟水的区域转移。例如,Hu等<sup>[29]</sup>测度了中国七大区域集成环境足迹的溢出和反馈效应,Chen等<sup>[30]</sup>基于溢出和反馈效应模型测算城市群尺度上虚拟水的双向转移。

基于现有研究的不足,本文进一步拓展溢出和反馈效应在环境领域的应用。以中国农业部门为研究对象,基于2007,2010和2012年《中国30省市区区域间投入产出表》,将30省区市(不包括西藏自治区、香港、澳门和台湾)合并为七大区域,对各区域与其他6个区域间水足迹、碳足迹及土地足迹的溢出-反馈效应进行定量测度。本研究旨在从溢出和反馈效应的新视角,分析农业部门的资源和环境压力转移,探究区域间资源环境压力转移的双向影响机制,从而明确区域环境压力现状,正确地划分区域环境责任,以期促进经济与环境的协调发展。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 区域间投入产出模型(IRIO)中的溢出-反馈效应

Miller<sup>[15]</sup>最早运用投入产出技术来测度不同地区间的经济反馈效应:假设有封闭的两个区域( $r$ 和 $s$ ),它们之间的基本区域间IO模型为

$$\begin{pmatrix} A^{rr} & A^{rs} \\ A^{sr} & A^{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^r \\ X^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y^r \\ Y^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^r \\ X^s \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, $X^r$ 表示地区 $r$ 的总产出, $Y^r$ 是地区 $r$ 的最终需

求,  $A^{rr}$  为区域  $r$  的区域内投入产出系数矩阵,  $A^{rs}$  为区域  $r$  和  $s$  的区域间投入产出系数矩阵。相似地,  $X^s$ ,  $Y^s$ ,  $A^{ss}$  和  $A^{sr}$  也如式(1)所示。

式(1)也可表示为

$$\begin{cases} (I - A^{rr})X^r - A^{rs}X^s = Y^r, \\ -A^{sr}X^r + (I - A^{ss})X^s = Y^s. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)可以转化为如下两个等式:

$$X^r = [(I - A^{rr}) - A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}A^{sr}]^{-1}Y^r + [(I - A^{rr}) - A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}A^{sr}]^{-1}A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}Y^s, \quad (3)$$

$$X^r = [I - (I - A^{rr})^{-1}A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}A^{sr}]^{-1}(I - A^{rr})^{-1}Y^r + (I - A^{rr})^{-1}Y^r + [I - (I - A^{rr})^{-1}A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}A^{sr}]^{-1}(I - A^{rr})^{-1}A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}Y^s. \quad (4)$$

如果给出如下定义:  $F^{rr} = [I - (I - A^{rr})^{-1}A^{rs}(I - A^{ss})^{-1}A^{sr}]^{-1}$ ,  $S^{rs} = (I - A^{rr})^{-1}A^{rs}$ , 那么式(4)可以简写成

$$X^r = F^{rr}L^{rr}Y^r + F^{rr}S^{rs}L^{ss}Y^s, \quad (5)$$

其中,  $S^{rs}$  是从区域  $s$  到区域  $r$  的溢出效应, 代表区域  $s$  的最终需求对区域  $r$  总产量的影响;  $F^{rr}$  是区域  $r$  对自身区域的反馈效应, 从区域  $r$  经过区域  $s$  再回到区域  $r$ 。

相似地,

$$X^s = F^{ss}L^{ss}Y^s + F^{ss}S^{sr}L^{rr}Y^r. \quad (6)$$

在式(5)和(6)的基础上, 潘文卿<sup>[14]</sup>进一步将式(1)用以下形式表达:

$$\begin{pmatrix} X^r \\ X^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L^{rr}Y^r \\ L^{ss}Y^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S^{rs}L^{ss}Y^s \\ S^{sr}L^{rr}Y^r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (F^{rr} - I)L^{rr}Y^r + (F^{rr} - I)S^{rs}L^{ss}Y^s \\ (F^{ss} - I)S^{sr}L^{rr}Y^r + (F^{ss} - I)L^{ss}Y^s \end{pmatrix}, \quad (7)$$

(i)                      (ii)                      (iii)

其中, (i)代表区域  $r$  或  $s$  的区域内乘数, 表示一个区域内不同产业部门的影响; (ii)表示区域  $r$  与  $s$  之间的区域间溢出效应; (iii)表示区域  $r$  与  $s$  之间的区域间反馈效应。假设只有该区域自身的最终需求增加, 而另一区域的最终需求没有任何变化, 则式(7)可表示为

$$\begin{pmatrix} X^r \\ X^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L^{rr}Y^r \\ L^{ss}Y^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S^{rs}L^{ss}Y^s \\ S^{sr}L^{rr}Y^r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (F^{rr} - I)L^{rr}Y^r \\ (F^{ss} - I)L^{ss}Y^s \end{pmatrix}. \quad (8)$$

(i)                      (ii)                      (iii)

## 1.2 资源和环境相关的溢出-反馈效应

唐志鹏等<sup>[31]</sup>对式(8)进行改进, 计算两个地区间

最终需求导致的碳排放溢出和反馈效应。在此基础上, 本文将其拓展至环境领域。假设行向量  $E$  的元素  $e_j^r$  和  $e_j^s$  表示区域  $r$  和  $s$  的部门  $j$  的单位产出的直接资源使用量, 在式(8)左右同时乘以向量  $E$ , 那么(i), (ii)和(iii)项可以用等式(9)~(11)表示:

$$MF = \begin{pmatrix} e_j^r & 0 \\ 0 & e_j^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L^{rr}Y^r \\ L^{ss}Y^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_j^r L^{rr}Y^r \\ e_j^s L^{ss}Y^s \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$SF = \begin{pmatrix} e_j^r & 0 \\ 0 & e_j^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S^{rs}L^{ss}Y^s \\ S^{sr}L^{rr}Y^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_j^r S^{rs}L^{ss}Y^s \\ e_j^s S^{sr}L^{rr}Y^r \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$FF = \begin{pmatrix} e_j^r & 0 \\ 0 & e_j^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (F^{rr} - I)L^{rr}Y^r \\ (F^{ss} - I)L^{ss}Y^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_j^r (F^{rr} - I)L^{rr}Y^r \\ e_j^s (F^{ss} - I)L^{ss}Y^s \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中, MF代表资源的乘数效应, SF代表资源的溢出效应, FF代表资源的反馈效应。

具体地, 当计算水足迹、碳足迹和土地足迹时,  $e_{wj}^r$ ,  $e_{cj}^r$  和  $e_{lj}^r$  代表区域  $r$  部门  $j$  单位产出的直接水使用量、直接碳排放量和直接土地利用量。

因此, 以计算水足迹为例, 区域  $r$  的水足迹的乘数效应(MWF)为

$$MWF_j^r = e_{wj}^r L^{rr}Y^r, \quad (12)$$

其中,  $MWF_j^r$  代表区域  $r$  部门  $j$  水足迹的乘数效应。

区域  $s$  对区域  $r$  水足迹的溢出效应为

$$SWF_j^{rs} = e_{wj}^r S^{rs} L^{ss} Y^s, \quad (13)$$

其中,  $SWF_j^{rs}$  表示区域  $r$  由于区域  $s$  的部门  $j$  最终需求导致的水足迹。

水足迹从区域  $r$  再返回到区域  $r$  (从区域  $r$  到区域  $s$  再到区域  $r$ ) 的反馈效应为

$$FWF_j^{rr} = e_{wj}^r (F^{rr} - I)L^{rr}Y^r, \quad (14)$$

其中,  $FWF_j^{rr}$  代表区域  $r$  由区域  $s$  产出增加而产生的水足迹, 而区域  $s$  的产出增加又是由区域  $r$  部门  $j$  最终需求所致。

## 1.3 数据来源

本研究以中国农业部门为研究对象, 选择的区域间投入产出表分别为 2007, 2010 和 2012 年的《中国 30 省区市区域间投入产出表》<sup>[32-34]</sup>。依据各地农业生产特征以及经济发展等因素, 本文将 30 省区

市(不包括西藏自治区、香港、澳门和台湾)合并为七大区域: 华北区域(north region, NO)、东北区域(north east region, NE)、华东区域(east region, EA)、华南区域(south region, SO)、中南区域(central south region, CS)、西北区域(north west region, NW)和西南区域(south west region, SW)(图1)。农业用水量和农业土地利用来自《中国统计年鉴》<sup>[35]</sup>, 农业能源消耗的数据来自《中国能源统计年鉴》<sup>[36]</sup>。基于其中的能量平衡表, 将能源分为九大类: 煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、液化石油、天然气、电力和热力。从联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)<sup>[37]</sup>获得二氧化碳排放系数。

在计算过程中, 由于涉及的区域较多, 为了简化表达, 以水足迹为例, NO及其他6个区域间的水足迹溢出效应和反馈效应表示如下: 1) 从NO农业部门溢出到其他6个区域的水足迹效应表示为 $SWF^{NO\sim}$ ; 2) 把从其他6个区域农业部门溢出到NO的水足迹效应表示为 $SWF^{NO\sim}$ ; 3) 在第一条的基础上, 从其他6个区域反馈到NO农业部门的水足迹效应表示为 $FWF^{NO\sim}$ ; 4) 在第二条的基础上, 把NO反馈到其他6个区域农业部门的水足迹效应表示为 $FWF^{NO\sim}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹溢出效应

2007, 2010和2012年中国区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出效应如图2所示。图2(a)~(c)分别表示水足迹、碳足迹和土地足迹的溢出效应。从总体上来看, EA、CS和NO的农业部门对国内其他区域水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出最大, 即这些区域农业部门对区际资源的需求量最大, 并且EA农业部门的需求量远大于其他两区域。以2012年为例,  $SWF^{EA}$ ,  $SWF^{CS}$ 和 $SWF^{NO}$ 分别为 $24.59 \times 10^9$ ,  $8.47 \times 10^9$ 和 $8.12 \times 10^9$   $m^3$ ;  $SCF^{EA}$ ,  $SCF^{CS}$ 和 $SCF^{NO}$ 分别为 $8.30 \times 10^6$ ,  $2.47 \times 10^6$ 和 $2.56 \times 10^6$  t;  $SLF^{EA}$ ,  $SLF^{CS}$ 和 $SLF^{NO}$ 分别为 $42.3 \times 10^6$ ,  $12.74 \times 10^6$ 和 $11.97 \times 10^6$   $hm^2$ 。NW, NE和SW农业部门对国内其他区域水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出最小。

国内其他区域农业部门对NW, NE, SW和CS的溢出效应最大, 即NW, NE, SW和CS对其他6个区域农业部门的水足迹-碳足迹-土地足迹供给最大。同样以2012年为例,  $SWF^{NW}$ ,  $SWF^{NE}$ ,  $SWF^{SW}$ 和 $SWF^{CS}$ 分别为 $22.86 \times 10^9$ ,  $11.61 \times 10^9$ ,  $37.12 \times 10^9$



基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站的标准地图(审图号为GS(2016)1579)制作

图1 中国七大区域划分图

Fig. 1 Diagram of seven regions of China

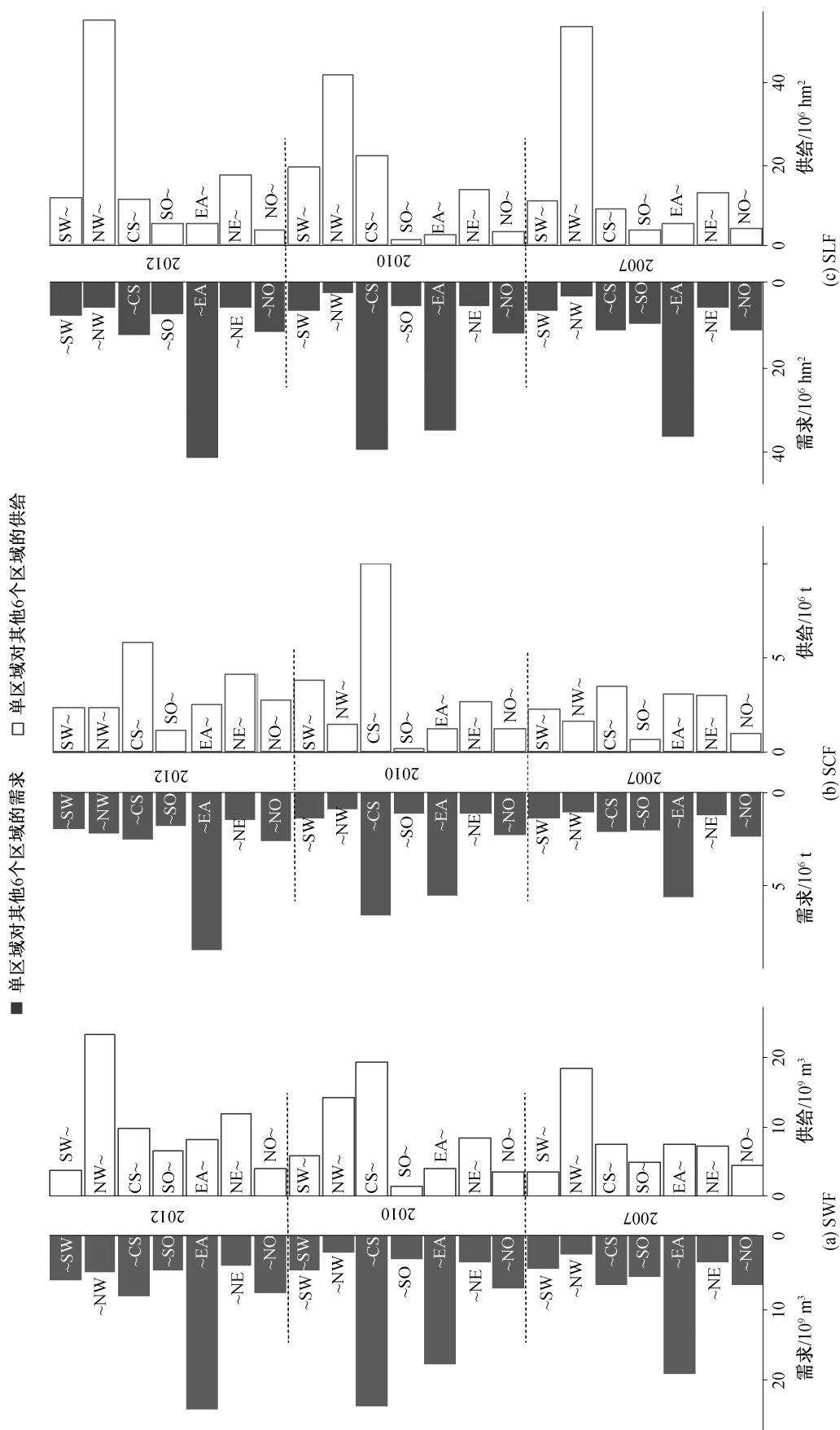


图 2 2007、2010 和 2012 年中国七区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出效应  
 Fig. 2 Spillover effect of SWF (a), SCF (b), and SLF (c) between seven regions of China's agriculture in 2007, 2010 and 2012

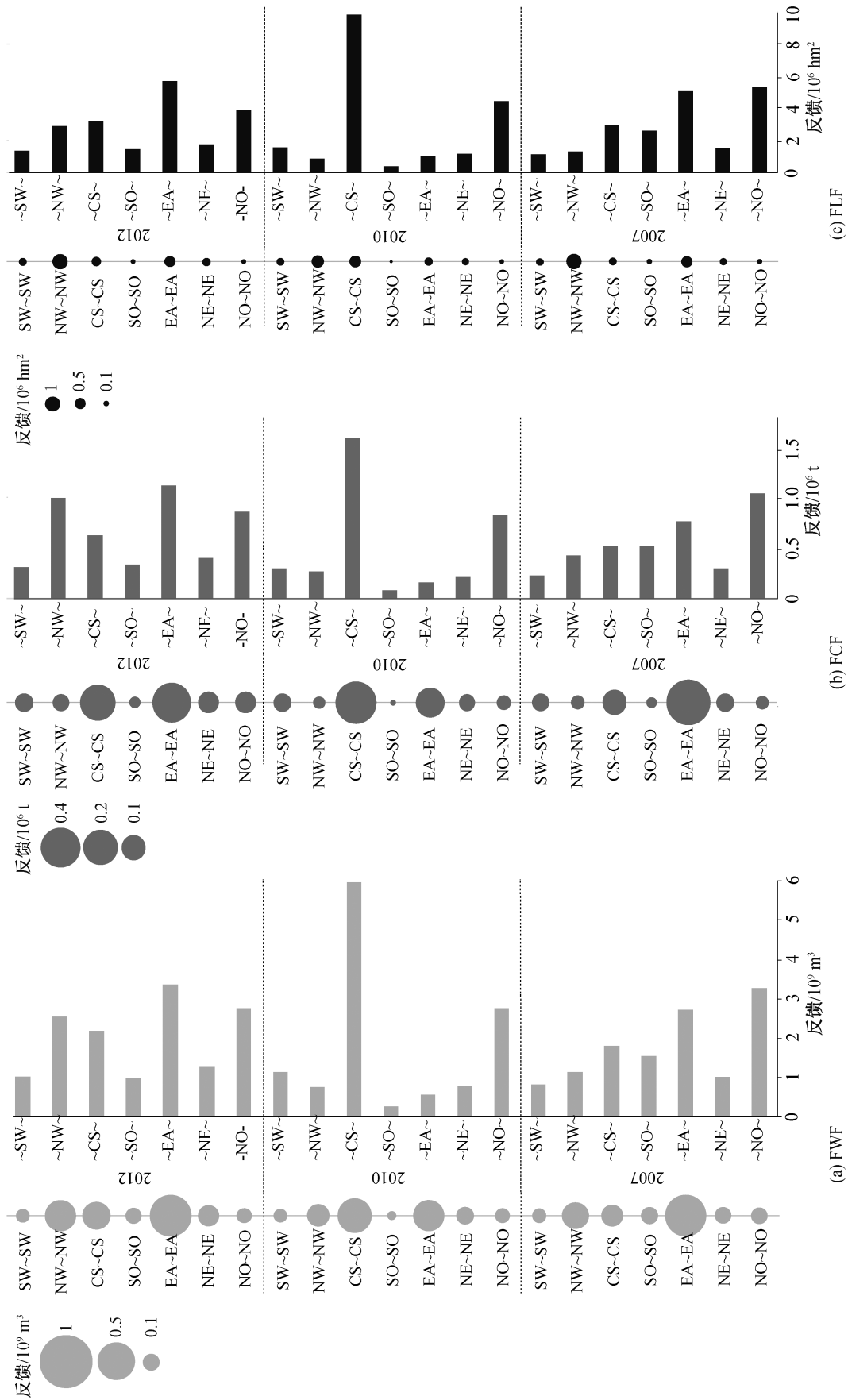


图 3 2007, 2010 和 2012 年中国七区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈效应  
 Fig. 3 Feedback effect of SWF (a), SCF (b), and SLF (c) between seven regions of China's agriculture in 2007, 2010 and 2012

和  $9.69 \times 10^9 \text{ m}^3$ ;  $\text{SCF}^{\text{NW}\sim}$ ,  $\text{SCF}^{\text{NE}\sim}$ ,  $\text{SCF}^{\text{SW}\sim}$  和  $\text{SCF}^{\text{CS}\sim}$  分别为  $2.37 \times 10^6$ ,  $4.13 \times 10^6$ ,  $2.37 \times 10^6$  和  $5.77 \times 10^6 \text{ t}$ ;  $\text{SLF}^{\text{NW}\sim}$ ,  $\text{SLF}^{\text{NE}\sim}$ ,  $\text{SLF}^{\text{SW}\sim}$  和  $\text{SLF}^{\text{CS}\sim}$  分别为  $54.01 \times 10^6$ ,  $16.79 \times 10^6$ ,  $11.18 \times 10^6$  和  $10.74 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

### 2.2 农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹反馈效应

图 3 给出 2007, 2010 和 2012 年中国区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈效应, 左右图分别代表单区域通过其他 6 个区域在反馈给自身的效应和其他 6 个区域通过对应的单区域再反过来对自身的反馈。

从单区域对自身的反馈来看, EA, CS 和 NW 的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈数值最大。以 2012 年的 EA 为例,  $\text{FWF}^{\text{EA}\sim\text{EA}}$ ,  $\text{FCF}^{\text{EA}\sim\text{EA}}$  和  $\text{FLF}^{\text{EA}\sim\text{EA}}$  分别为  $0.80 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,  $0.25 \times 10^6 \text{ t}$  和  $0.52 \times 10^6$

$\text{hm}^2$ 。相反地, 从总体上看, SO 的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈数值最小。同样以 2012 年的 SO 为例,  $\text{FWF}^{\text{SO}\sim\text{SO}}$ ,  $\text{FCF}^{\text{SO}\sim\text{SO}}$  和  $\text{FLF}^{\text{SO}\sim\text{SO}}$  分别为  $0.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,  $0.02 \times 10^6 \text{ t}$  和  $0.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在另一方面, 从多区域对自身的反馈角度, NO, EA, NW 和 CS 的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈数值整体上最大。

### 2.3 农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈/溢出百分比

从 2007, 2010 到 2012 年, 中国不同区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈/溢出比例呈现显著的差别。图 4 中间的 3 组圆形分别对应水足迹、碳足迹和土地足迹的反馈/溢出比例, 圆的面积越大, 对应的数值越大。

从总体上看, 2007—2012 年的比例没有显著地

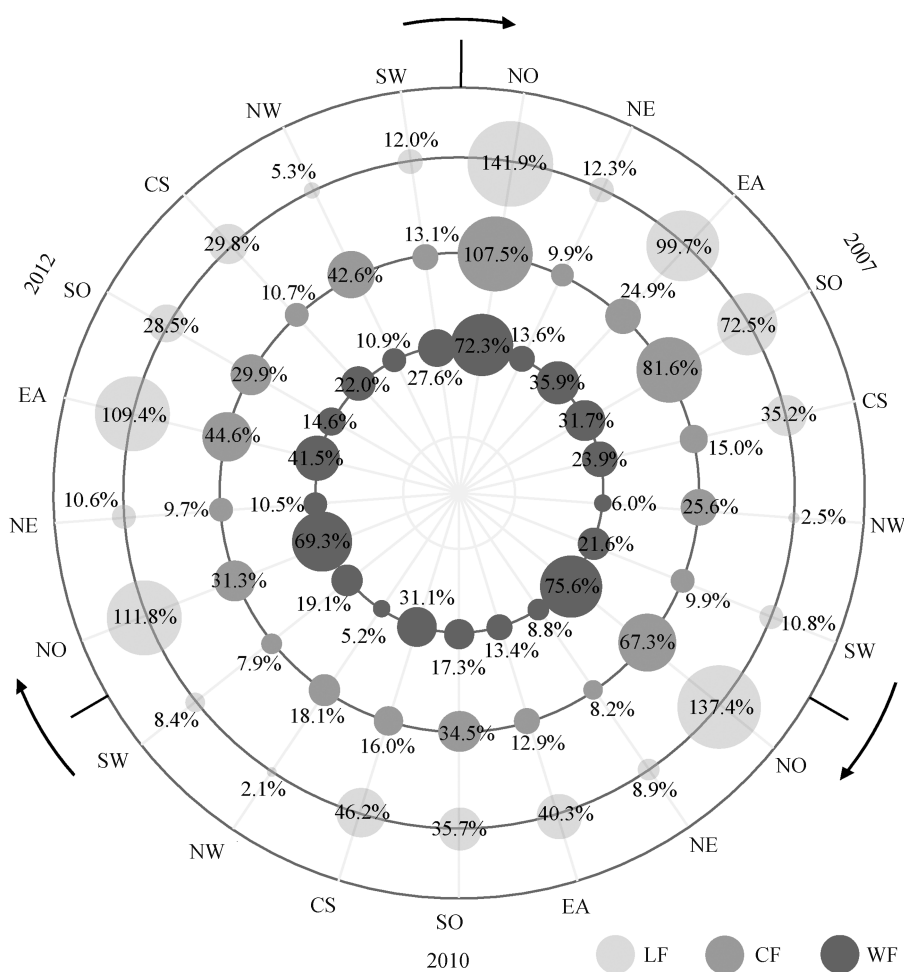


图 4 2007, 2010 和 2012 年中国区域间农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈/溢出  
 Fig. 4 Ratio of feedback effect to spillover effect of SWF (a), SCF (b), and SLF (c) between seven regions of China's agriculture in 2007, 2010 and 2012

增大或减小,但不同区域的数值差别显著。NO的农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈/溢出比例最大。以水为例,2007—2012年,NO区域对应的比例分别为72.3%,75.6%和69.3%。此外,EA,SO和CS所对应的比例也较大。以2007年的水足迹-碳足迹-土地足迹为例,EA农业部门对应的比例分别为35.9%,24.9%和99.7%,SO农业部门对应的比例分别为31.7%,81.6%和72.5%,CS农业部门对应的比例分别为23.9%,15.0%和35.2%。NE,SW和NW农业部门对应的比例总体上较小。以NE为例,水足迹-碳足迹-土地足迹对应的比例均在8.2%~13.6%之间。

### 3 讨论

#### 3.1 不同尺度的农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹溢出反馈效应

资源和环境的影响可以通过贸易跨区域转移,一个地区的经济发展可能对另一个地区产生影响。由于经济的溢出和反馈机制,使得区域间的相互影响非常复杂。在时间尺度上,2007—2012年农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的需求总体上略有上升,但差异不显著。在空间尺度上,不同区域间的溢出效应、反馈效应以及反馈/溢出比值都存在较大的差异。

对于区际溢出效应,EA,CS和NO的农业部门对国内其他区域水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出效应最大,表明这3个区域的农业部门向全国其他区域转移的环境压力最大。这3个区域的农业需求使得较多的水资源、土地资源压力以及碳排放压力向国内其他区域转移。区域本身对资源的需求、区域本身的资源禀赋以及成本等因素影响区域资源压力的溢出。首先,这3个区域都是经济水平较高的区域,吸引着大量的资源-能源流动,其发展高度依赖其他区域的资源能源,通过国内贸易网络,消耗了大量隐含资源<sup>[38]</sup>。同时,这3个区域农业部门生产总产值较大,并且人口数量很多,为了满足人们的生产生活需要,地区农业部门的总需求相对较大。对于NO地区,其本身资源丰度低,所以在农业生产中倾向于利用外部资源。在这3个区域中,EA农业部门是国内贸易中最大的进口者,它将很大一部分资源压力转移到国内其他区域<sup>[23-24,39]</sup>。究其原因,一方面,EA农业部门经济上的最终需求最大,自然资源丰度并不大,并且区域本身资源消耗的成

本也较大,基于其农业部门的巨大需求,大量使用其他区域的资源,在一定程度上导致EA的农业部门向其他区域转移了最大的资源压力。另一方面,NW,NE和SW的农业部门对其他区域水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出效应最小,而其他区域的农业部门对NW,NE,SW和CS的溢出效应最大。原因是这些区域自然资源禀赋相对较大,如东北区域,其黑土地土壤肥沃,含丰富的有机质,可以给作物提供很好的营养,是中国重要的粮食作物的供应地,西北地区地广人稀,日照和土地资源也很丰富。

对于区际反馈效应,从单区域对自身的反馈来看,EA,CS和NW的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈效应最大。以2012年EA的农业部门为例, $FWF^{EA-EA}$ , $FCF^{EA-EA}$ 和 $FLF^{EA-EA}$ 分别为 $0.80 \times 10^9 \text{ m}^3$ , $0.25 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $0.52 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。相反,总体上SO的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈效应最小。同样以2012年SO的农业部门为例, $FWF^{SO-SO}$ , $FCF^{SO-SO}$ 和 $FLF^{SO-SO}$ 分别为 $0.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ , $0.02 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $0.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在另一方面,从多区域对自身的反馈角度,整体上看,NO,EA,NW和CS的农业部门对水足迹-碳足迹-土地足迹反馈效应最大。综合来看,NO,EA,NW和CS的农业部门在国内贸易中对水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈效应最大,也就是说这4个区域的农业部门在国内贸易中的参与度和依赖程度都较大。虽然SO区域农业发达,同样需要大量资源和能源,但其更多地参与国际贸易,对国内贸易的依赖程度相对较小<sup>[31]</sup>。

反馈/溢出比值在一定程度上证明了区域间反馈作用在资源环境压力转移中的贡献是不能忽略的。首先,从时间尺度上看,各区域环境足迹溢出/反馈效应的比例并没有显著的变化;其次,从区域尺度上看,NO的农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的反馈/溢出比值最大,说明NO的农业部门在国内贸易的参与度和依赖程度最大。对一个闭合流动路径来讲,反馈的比值并不小,部分年份大于100%。原因在于,反馈与溢出是一个闭合的流动路径,分子为大区域(其他6个区域)对单个区域的反馈,分母是小区域(单个区域)对其他6个区域的溢出。反馈相当于第二次溢出,当单个区域农业部门在国内贸易中的参与度和依赖程度都较大时,其他6个区域对这个单区域的反馈效应就比较大。又因为6个区域比一个区域大很多,需求的数量级和单个区域的数量级差别很大,此时反馈/溢出比值就

可能出现大于100%的情况。此外,各区域之间的足迹比例存在较大的差异。比例较大的区域集中在NO, EA, CS区域和SO区域。这些区域在一定程度上均为产品的进口区域,自身资源禀赋有限,经济发展更加依赖外部进口,大量的环境压力溢出到其他区域,因而承担着较大的反馈效应<sup>[30]</sup>。此外,西北区域为七大区域中主要环境压力的承受者,通过出口大量产品来满足自身经济发展的需求,因而受到的反馈效应较小,NW区域的反馈/溢出比值最小。因此,比例较大的区域更应承担起相应的环境责任。

### 3.2 与以往研究结果的比较

与以往的经济领域溢出-反馈效应研究结果相比,本文结果存在异同之处。首先,对单个区域来讲,通过比较其他区域对其溢出效应以及本区域对自身的反馈效应,本文发现其溢出效应远大于反馈效应。这一结果与经济学领域中潘文卿<sup>[13]</sup>和Hewings等<sup>[40]</sup>的研究结果一致。另外,本文中反馈/溢出比值总体上没有增加,与潘文卿<sup>[13]</sup>的研究结果不同。这说明在资源环境领域,各产业的发展并不像经济领域一样,随着时间推移而更加依靠区际间产业的相互拉动作用,不同区域之间的水足迹-碳足迹-土地足迹的交互作用没有逐年增加。

此外,与以往研究中认为经济领域的反馈效应可以忽略不计<sup>[15-16]</sup>不同,本研究证实了反馈效应是足够重要的。本研究通过比较水足迹-碳足迹-土地足迹反馈/溢出比值,发现多个区域在3年中该比值都较高。例如,EA, NO, SO和CS农业部门的反馈/溢出比值较大,意味着就资源-经济区域之间的联系而言,EA, NO, SO和CS的农业部门与其他区域的联系更为紧密,更多的隐性资源(水、土、气)在这些区域参与的区际贸易中得到转移。这些区域经济发展水平相对较高,其经济发展对国内资源的依赖较多;相反,NE, SW和NW的农业部门反馈/溢出比值较小,对其他区域资源的依赖较少。

### 3.3 局限性

由于现有方法的限制,无法探究七大区域内部区域之间的相互关联。未来可以探寻对现有的分解模型加以改进,进一步细化评价两两区域之间的影响。其次,本研究采用的投入产出表与实际情况有一定的时间差,具有一定的滞后性,后续工作可考虑用更新的投入产出表来进行测算。最后,由于碳排放缺乏直接的数据来源,本研究通过排放系数法

估算得到,与实际排放量可能存在一定的偏差。后续研究中,将以更科学的方法和更准确的数据来评价区域间的资源环境压力转移,以提供更具参考价值的科学建议。

## 4 结论与建议

本文对2007—2012年中国七大区域农业部门水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出和反馈效应进行研究,得出以下结论。

1) 从总体上看,区际环境影响表现为乘数效应较大,其次为溢出效应,反馈效应最小,但反馈效应不容忽视。

2) 从溢出-反馈角度看,2007—2012年中国七大区域的区际水足迹-碳足迹-土地足迹的溢出-反馈效应空间尺度差别很大,但时间尺度的差别并不显著。

3) 基于华北(NO),华东(EA)和中南(CS)地区农业部门的最终需求使得较大的环境压力溢出到其他区域。其他区域的农业部门对西北(NW),东北(NE),西南(SW)和中南(CS)地区的溢出效应较大。

4) 在区际水足迹-碳足迹-土地足迹的转移中,反馈效应较为显著,不应被忽略。其中,NO区域农业部门的反馈/溢出比值最大,均大于31.3%;EA,SO和CS区域农业部门的反馈/溢出比值较大,均大于10.7%。

在上述结论的基础上,本文从溢出-反馈角度得出以下中国区域协调绿色发展的相关政策启示。

1) 明确各区域环境压力现状,合理地调整区域贸易结构。NE, NO和CS等区域将大量环境压力溢出到其他区域,属于贸易优势区域;NW, SW和NE等区域承担较大的环境压力,属于贸易劣势区域。据此,应合理地调整贸易结构,贸易劣势区域应减少低附加值产品的出口,以便减轻区域环境负担;贸易优势区域应积极出资,促进贸易劣势区域的产业升级。

2) 正确地划分各区域的环境责任。NO和NE等区域有较大的溢出效应,同时也承担着明显的反馈效应。因此,在区域责任划分时,不应实行“一刀切”政策,而应充分考虑其反馈效应的影响,合理地划分区域环境责任。

3) 加强区域联动,合理地调整区域资源禀赋与需求量之间的关系。NO和NE等区域资源需求量较大,自身的资源禀赋不能满足经济发展的需求,

因此需建立区域间联动机制, 加强合作, 通过合理规划贸易进口或出口等方式调整资源禀赋与需求量之间的关系, 实现资源的合理分配。

4) 重视水足迹、碳足迹和土地足迹等多环境要素之间的关系。各足迹之间有联系, 也有区别, 决策者应针对多种环境要素, 进行综合考虑, 以期实现区域可持续发展。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2018年中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2018
- [2] Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. Global carbon budget 2018. *Earth Syst Sci Data Discuss*, 2018: 2142–2194
- [3] 纪学朋, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价——以辽宁省为例. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 451–463
- [4] Vermeulen S J, Campbell B M, Ingram J S I. *Climate change and food systems*. Social Science Electronic Publishing, 2012, 37: 195–222
- [5] Yu Y, Hubacek K, Feng K S, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140–1147
- [6] Vanham D, Bidoglio G. The water footprint of Milan. *Water Science & Technology*, 2014, 69(4): 789–795
- [7] Bellarby J, Foeroid B, Hastings A, et al. Cool farming: climate impacts of agriculture and mitigation potential. Amsterdam: Greenpeace, 2008
- [8] Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. *Climate change 2014: mitigation of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [9] Hammond G. Time to give due weight to the ‘carbon footprint’ issue. *Nature*, 2007, 445: 256
- [10] Wang Z Y, Huang K, Yang, S S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 172–179
- [11] Hu J R, Huang K, Ridoutt B G, et al. Rethinking environmental stress from the perspective of an integrated environmental footprint: application in the Beijing industry sector. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 1051–1060
- [12] Wilting H C. Carbon and land footprint time series of the Netherlands-integrating data from the GTAP and WIOD databases // 22th International Input-Output. Lisbon, 2014: 1–18
- [13] 潘文卿. 地区间经济影响的反馈与溢出效应. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(7): 86–91
- [14] 潘文卿. 中国沿海与内陆间经济影响的溢出与反馈效应. *统计研究*, 2012, 29(10): 30–38
- [15] Miller R E. Interregional feedback effects in input-output models: some preliminary results. *Papers of the Regional Science Association*, 1966, 17: 105–125
- [16] Miller R E. Interregional feedbacks in input-output models-some experimental results. *Western Economic Journal*, 1969, 7: 41–50
- [17] Pyatt G, Round J I. Accounting and fixed price multipliers in a social accounting matrix framework. *Economic Journal*, 1979, 89: 850–873
- [18] Round J I. Decomposing multipliers for economic systems involving regional and world trade. *Economic Journal*, 1985, 95: 383–399
- [19] 吴福象, 朱蕾. 中国三大地带间的产业关联及其溢出和反馈效应——基于多区域投入-产出分析技术的实证研究. *南开经济研究*, 2010(5): 140–152
- [20] Isard W. Interregional and regional input-output analysis: a model of a space-economy. *Review of Economics & Statistics*, 1951, 33: 318–328
- [21] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, 69: 211–222
- [22] Zhang Y G, Tang Z P. Driving factors of carbon embodied in China’s provincial exports. *Energy Economics*, 2015, 51: 445–454
- [23] 黄蕊, 王铮, 钟章奇, 等. 区域贸易隐含碳排放和SO<sub>2</sub>排放的投入产出分析——以江苏为例. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 854–863
- [24] 崔盼盼, 张艳平, 张丽君, 等. 中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 879–892
- [25] Li Y M, Luo E H, Zhang H L, et al. Measuring interregional spillover and feedback effects of economy and CO<sub>2</sub> emissions: a case study of the capital city agglomeration in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 139: 104–113
- [26] Zhang Y G. Interregional carbon emission spillover-feedback effects in China. *Energy Policy*, 2017, 100: 138–148
- [27] Ning Y D, Miao L, Ding T, et al. Carbon emission spillover and feedback effects in China based on a

- multiregional input-output model. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 141: 211–218
- [28] Wang J D, Dong K Y, Dong X C, et al. Research on the carbon emission effect of the seven regions along the belt and road — based on the spillover and feedback effects model. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128758
- [29] Hu J R, Huang K, Ridoutt B G, et al. Measuring integrated environmental footprint transfers in China: a new perspective on spillover-feedback effects. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118375
- [30] Chen Y, Huang K, Hu J R, et al. Understanding the two-way virtual water transfer in urban agglomeration: a new perspective from spillover-feedback effects. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127495
- [31] 唐志鹏, 刘卫东, 公丕萍. 出口对中国区域碳排放影响的空间效应测度: 基于 1997—2007 年区域间投入产出表的实证分析. *地理学报*, 2014, 69(10): 1403–1413
- [32] 刘卫东, 陈杰, 唐志鹏, 等. 中国 2007 年 30 省市区区域间投入产出表编制理论与实践. 北京: 中国统计出版社, 2012
- [33] 刘卫东, 唐志鹏, 陈杰, 等. 中国 2010 年 30 省市区区域间投入产出表编制理论与实践. 北京: 中国统计出版社, 2014
- [34] Mi Z F, Meng J, Guan D B, et al. Chinese CO<sub>2</sub> emission flows have reversed since the global financial crisis. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1712
- [35] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008
- [36] 国家统计局. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2011
- [37] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Kanagawa: IGES, 2019
- [38] Guo S, Shen G Q. Multiregional input-output model for china's farm land and water use. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 403–414
- [39] Meng B, Xue J J, Feng K S, et al. China's inter-regional spillover of carbon emissions and domestic supply chains. *Energy Policy*, 2013, 61: 1305–1321
- [40] Hewings G J D, Oosterhaven J. Interregional trade models // Fischer M M, Nijkamp P. *Handbook of Regional Science*. Berlin: Springer, 2014: 903–925