

葛泓希,陈 儒,姜志德. 西北地区低碳农业联合生产强度测算与分析[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):327-334.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.070

# 西北地区低碳农业联合生产强度测算与分析

葛泓希,陈 儒,姜志德

(西北农林科技大学经济管理学院,陕西杨凌 712100)

**摘要:**结合 1995—2015 年西北地区农业生产的面板数据,估算农业碳排放量与净碳汇量,在此基础上运用农业碳脱钩、耦合模型计算低碳农业的联合生产强度,并基于扩展的 LMDI 模型进行影响因素分析。结果表明,1995—2015 年西北地区农业碳排放呈现两阶段增长趋势,农业净碳汇量则经历了“波动增长—低谷—持续增长”三阶段变动;农业碳排放与经济增长处于弱脱钩状态,联合生产强度由净碳汇量与经济增长的耦合程度反映,处于弱耦合状态,虽然农业碳排放量、净碳汇量的增长速度稍慢于经济增长,但整体上农业经济与生态环境处于良性互动发展之中;农业碳脱钩、耦合效应可分解为农业碳强度、农业产业结构、农业经济发展水平、城镇化水平、农业人口规模等 5 个效应,其中农业碳强度是影响西北地区碳脱钩与耦合的关键因素,农业经济水平对脱钩与耦合效应的贡献率较稳定。

**关键词:**联合生产强度;碳脱钩;碳耦合;影响因素;西北地区

**中图分类号:** F323.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0327-08

农业生产是全球温室气体的第二大排放源,也是应对气候变化的重要领域。中国作为农业大国,农业碳排放量约占总体碳排放量的 17%<sup>[1]</sup>。不同于工业等其他产业,农业生产在释放大量的温室气体的同时,也可以通过农作物的光合作用以及农地土壤固碳能力吸收、封存温室气体。因此,农业生产兼具碳排放和碳汇双重功能。目前学术界围绕农业碳排放和碳汇展开了丰富的研究,涉及碳排放量与碳汇量测算体系的构建<sup>[2-3]</sup>、低碳农业发展绩效评价<sup>[4]</sup>、碳脱钩及其影响因素分析<sup>[5]</sup>等,同时指出发展低碳农业是未来实现绿色生产的重要途径之一。然而西北地区气候干旱,植被覆盖率低,荒漠化面积广阔,与东部、中部地区生态环境相比更为脆弱,因此,关注西北地区低碳农业的发展具有十分重要的现实意义和学术价值。目前,学界对西北地区低碳农业的研究已经有了初步的介入。马蓓蓓等回顾了陕西省碳排放数量和结构的变化,并对碳排放变化的主要因素进行了分析<sup>[6]</sup>;冉锦成等在估算、分析西北 5 省农业碳排放的基础上,构建环境效率评估模型测算了西北地区农业碳减排潜力指数<sup>[7]</sup>;张振龙等运用非参数核密度方法对西北干旱区农牧业生态系统碳排放的演进趋势进行分析,并剖析了各省农业碳排放总量与强度的差异等<sup>[8]</sup>。现有研究成果已为进一步探究西北地区农业碳问题奠定了坚实的基础,随着近年来有关低碳农业研究的深入,学者们开始关注农业碳排放、碳汇与经济增长之间的关系,旨在探究农业低碳发展能否实现经济效益与生态效益的共赢。李波等基于投入视角测算了我国农业碳排放量与经济增长的脱

钩关系,发现主要农业省份碳排放弹性特征存在明显的区域差异<sup>[9]</sup>;张玉梅等运用 Tapio 弹性分析方法探究大城市农业经济增长与农业碳排放的脱钩关系,并分解出农业碳排放技术脱钩弹性、结构脱钩弹性分析其时空演变趋势<sup>[10]</sup>;王太祥等测算了西北干旱区农地利用碳排放量,考察其与农业经济增长的响应关系并分析碳排放的影响因素,同时预测了农地利用碳排放零增长的时点<sup>[11]</sup>。总体而言,目前对低碳农业与经济增长关系的研究相对零散,较缺乏的是未能将农业碳排放与碳汇纳入到一个框架内进行分析,从而忽视了农业碳汇供给侧与经济增长的内在关系,同时对于现有农业碳排放与经济增长关系的研究,学者在研究区域的选择上对西北这一特殊生态环境地区的关注较少。因此,本研究基于联合生产理论和 Tapio 脱钩理论,运用碳脱钩、耦合模型及 LMDI 恒等式,结合 1995—2015 年西北 5 省农业生产的的面板数据,实证分析西北地区农业碳排放量、碳汇量与经济增长的脱钩、耦合状况,总结西北地区农业碳排放量和碳汇量的变化趋势,探究农业碳排放脱钩和净碳汇耦合的分解效应,以期对西北地区低碳农业发展提供理论依据。

## 1 指标测度与数据来源

### 1.1 低碳农业的联合生产强度

联合生产是指相同的要素投入可以带来 2 种或 2 种以上产品的生产过程,这些产品可能存在技术、经济和制度等方面的联合,在形式上大致可以归类为经济产出与非经济产出的某种组合<sup>[12]</sup>。农业生产过程不仅涉及农产品的生产,还包括伴随农业生产过程产生的碳产品,按照人类需求可以将其划分为 2 类:一类是作为目标产出的期望产品——“农产品或碳汇”;另一类是联合产出的非期望产品——“农业废弃物”。由于近年来温室气体对气候环境的影响程度不断加深,可以将温室气体从农业废弃物中分离出来成为专门的一类非期望产出,这样就形成了具有 4 类联合产出的联合生产格局<sup>[13]</sup>。农业生产涉及 2 类碳产品,碳排放代表了农业生产的负外部

收稿日期:2018-04-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:71573212);国家自然科学基金青年项目(编号:71403214);教育部人文社会科学基金(编号:14XJC790013)。

作者简介:葛泓希(1994—),女,云南玉溪人,硕士研究生,主要从事低碳农业研究。E-mail:gehongxi0507@163.com。

通信作者:姜志德,教授,博士生导师,主要从事农业资源经济与环境管理研究。E-mail:786376900@qq.com。

性,碳汇则代表农业生产的正外部性;OECD 在研究多功能农业时构建了包含农产品和正负外部性的联合产出模型<sup>[14]</sup>,而目前的研究大都单方面考察农业碳排放量或碳汇量与经济增长的关系,对农业生产过程中碳循环的理解具有一定的片面性,对农业发展作出的评价也带有一定的局限性。

为衡量农业发展的环境效益,以净碳汇与经济产值的耦合程度来反映低碳农业的联合生产强度是较合理的,净碳汇等于总碳汇量减去碳排放量,能够反映农业对环境影响的净效应。本研究首先考察农业碳排放量与经济增长的脱钩关系,评估西北地区农业发展的负外部性;再考虑农业碳汇功能,以净碳汇量与经济增长的耦合程度来考察低碳农业的联合生产强度,符合农业生产特性,能够对低碳农业的发展作出客观全面的评价。

1.2 计量模型构建

1.2.1 农业碳计量模型 测算农业碳排放量和碳汇量是对低碳农业发展现状进行评价的基础,本研究根据陈儒等的相关研究成果<sup>[15-16]</sup>,确定种植业碳排放主要来源有农资投入(化肥、农药、农膜等)、农地利用(翻耕、稻田水淹等)、农业能源投入(灌溉能源消耗、农用柴油),畜牧业碳排放主要来源有牲畜肠道发酵和粪便管理;确定农业碳汇主要来源有农作物和林木生物量,构建的农业碳计量模型如下:

$$E = \sum E_i = \sum T_i \times e_i。$$
 (1)

式中: $E$  表示农业碳排放总量; $E_i$  表示各种碳排放源的排放量; $i$  表示碳排放源类型; $T_i$  表示各类碳源消耗量; $e_i$  表示各碳排放源系数。

$$C_{crop} = \sum C_{crop-1} = \sum c_i \times Y_i \times (1 - r_i) / H_i。$$
 (2)

式中: $C_{crop}$  表示农作物碳汇总量; $C_{crop-1}$  表示各类农作物的碳吸收量; $i$  表示农作物种类; $c_i$  表示农作物的碳吸收率; $Y_i$  表示农作物产量; $r_i$  表示相应农作物经济产品部分的含水量; $H_i$  表示农作物经济系数。

$$C_{tree} = \sum C_{tree-1} = \sum C_{pi} \times A_i。$$
 (3)

式中: $C_{tree}$  表示林木固碳量; $C_{tree-1}$  表示各类林木的碳吸收量; $i$  表示林木种类; $C_{pi}$  表示不同种类林木的碳密度; $A_i$  表示林木的栽植面积。

$$C_n = C_{crop} + C_{tree} - E。$$
 (4)

式中: $C_n$  为净碳汇量,表示农业生产经营过程中碳汇量减去碳排放量的剩余。由于本研究仅考察农业生产过程中的碳排放量与碳汇量,故未将林业碳汇纳入核算体系,各碳排放系数、农作物的碳吸收率及经济系数参考值来自于相关研究成果<sup>[15-18]</sup>。

1.2.2 农业碳排放脱钩模型 脱钩理论是分析经济发展与资源消耗关系的工具,OECD 环境研究领域的学者首次将脱钩分析方法引入环境与经济学研究,2005 年芬兰未来研究中心的 Tapio 在 OECD 基础上创新地提出了脱钩弹性的计算公式<sup>[19]</sup>,以此反映碳排放量变化对经济变化的敏感程度,所得结果的准确性和客观性更佳。

$$e = (\Delta E / E) / (\Delta G / G)。$$
 (5)

式中: $e$  表示农业碳排放量与农业经济增长的脱钩系数; $\Delta E$  表示计算周期内碳排放变化量,万 t; $E$  表示计算初期碳排放量,万 t; $\Delta G$  表示计算周期内农业经济产值变化量,亿元; $G$  表示计算初期农业经济产值,亿元。根据弹性值不同,可以将脱

钩弹性类型细分为 8 种(表 1)。

表 1 脱钩状态分类与评价标准

| 类型  | 脱钩状态  | $\Delta E$ (碳排放量变动) | $\Delta G$ (农业产值变动) | $e$ (脱钩系数)            |
|-----|-------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 负脱钩 | 扩张负脱钩 | >0                  | >0                  | $e > 1.2$             |
|     | 弱负脱钩  | <0                  | <0                  | $0 \leq e < 0.8$      |
|     | 强负脱钩  | >0                  | <0                  | $e < 0$               |
| 脱钩  | 衰退脱钩  | <0                  | <0                  | $e > 1.2$             |
|     | 弱脱钩   | >0                  | >0                  | $0 \leq e < 0.8$      |
|     | 强脱钩   | <0                  | >0                  | $e < 0$               |
| 连接  | 增长连接  | >0                  | >0                  | $0.8 \leq e \leq 1.2$ |
|     | 衰退连接  | <0                  | <0                  | $0.8 \leq e \leq 1.2$ |

1.2.3 农业碳汇耦合模型 耦合是 2 个或 2 个以上系统之间通过各种作用而彼此影响的现象,引申意义指 2 个或 2 个以上事物的相互关联程度,将耦合运用到农业碳汇量和农业产值上,可以衡量农业产值增加与农业碳汇量增长之间的衔接关系<sup>[20]</sup>。结合 Tapio 脱钩理论,构建耦合状态的弹性计算公式如下:

$$t = (\Delta C_n / C_n) / (\Delta G / G)。$$
 (6)

式中: $t$  表示农业碳汇量与农业经济增长的耦合弹性指数; $\Delta C_n$  表示计算周期内净碳汇变化量,万 t; $C_n$  表示计算初期净碳汇量,万 t。根据弹性值不同,将农业产值与农业碳汇量的耦合类型归为扩张耦合、增长连接、强耦合、弱耦合、强负耦合、衰退负耦合、衰退连接、弱负耦合等 8 种类型(表 2)。

表 2 耦合状态分类与评价标准

| 状态    | $\Delta C_n$<br>(碳汇量变动) | $\Delta G$<br>(农业产值变动) | $t$<br>(耦合系数)      |
|-------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 扩张耦合  | >0                      | >0                     | $t \geq 1.2$       |
| 增长连接  | >0                      | >0                     | $0.8 \leq t < 1.2$ |
| 弱耦合   | >0                      | >0                     | $0 < t < 0.8$      |
| 强耦合   | >0                      | <0                     | $t < 0$            |
| 强负耦合  | <0                      | >0                     | $t < 0$            |
| 衰退负耦合 | <0                      | <0                     | $t \geq 1.2$       |
| 衰退连接  | <0                      | <0                     | $0.8 \leq t < 1.2$ |
| 弱负耦合  | <0                      | <0                     | $0 < t < 0.8$      |

1.2.4 脱钩/耦合效应影响因素的 LMDI 分解 上述脱钩及耦合模型通过计算碳排放量、净碳汇量变动与农业经济产值变动的比值关系,直观地反映出经济增长与碳排放的总量关系,但难以对脱钩、耦合效应产生的原因进行深入的分析。因此,本研究引入 Kaya 恒等式和 LMDI 因素分解法解析脱钩、耦合效应的背后原因。Kaya 恒等式构建了二氧化碳排放量与人口规模、国内生产总值之间的关系<sup>[21]</sup>,依据西北地区低碳农业发展与经济增长的特点,本研究在 Kaya 一般形式中加入了城镇化、农业结构等因素,构建扩展 Kaya 恒等式如下:

$$E = \frac{E}{AGRI} \times \frac{AGRI}{AGR} \times \frac{AGR}{POP} \times \frac{POP}{APOP} \times APOP。$$
 (7)

式中: $E$ 、 $AGRI$ 、 $AGR$ 、 $POP$ 、 $APOP$  分别表示农业碳排放量、种植业总产值、农林牧渔业总产值、全社会总人口规模、农业人口规模。定义  $\alpha = E / AGRI$  为农业碳排放强度,以单位种植业产值的碳排放量进行衡量; $\beta = AGRI / AGR$  为农业产业结构,以种植业在农林牧渔业中的比重衡量; $\gamma = AGR / POP$  为人均农

业生产总值,以农林牧渔业生产总值与社会总人口规模的比值衡量; $\delta = POP/APOP$  为城镇化水平,以全社会总人口规模与农业人口规模的比值衡量; $\varepsilon = APOP$  为农业人口规模,以农业人口总规模为准。因此,农业碳排放被分解为农业碳排放强度、农业产业结构、农业经济水平、城镇化水平、农业人口规模等 5 个因素。假设  $E^0$  和  $E^T$  分别表示基期和第  $T$  期的碳排放量,根据 LMDI 分解法中的“加和分解”,则第  $T$  期相对于基期的碳排放变化量  $\Delta E$  可分解为

$$\Delta E = \Delta E_{\alpha} + \Delta E_{\beta} + \Delta E_{\gamma} + \Delta E_{\delta} + \Delta E_{\varepsilon}; \quad (8)$$

式中: $\Delta E_{\alpha}$ 、 $\Delta E_{\beta}$ 、 $\Delta E_{\gamma}$ 、 $\Delta E_{\delta}$ 、 $\Delta E_{\varepsilon}$  分别表示农业碳排放强度、农业产业结构、农业经济水平、城镇化水平、农业人口规模的变动对农业碳排放量的影响,其各自分解结果分别为:

$$\Delta E_{\alpha} = w_i \times (\ln \alpha^T - \ln \alpha^0); \quad (9)$$

$$\Delta E_{\beta} = w_i \times (\ln \beta^T - \ln \beta^0); \quad (10)$$

$$\Delta E_{\gamma} = w_i \times (\ln \gamma^T - \ln \gamma^0); \quad (11)$$

$$\Delta E_{\delta} = w_i \times (\ln \delta^T - \ln \delta^0); \quad (12)$$

$$\Delta E_{\varepsilon} = w_i \times (\ln \varepsilon^T - \ln \varepsilon^0). \quad (13)$$

其中

$$w_i = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0}. \quad (14)$$

联立公式(5)和公式(7),即可得到 Tapio 脱钩指数的分解模型:

$$e = \frac{\Delta E/E}{\Delta G/G} = \frac{\Delta E_{\alpha}/E}{\Delta G/G} + \frac{\Delta E_{\beta}/E}{\Delta G/G} + \frac{\Delta E_{\gamma}/E}{\Delta G/G} + \frac{\Delta E_{\delta}/E}{\Delta G/G} + \frac{\Delta E_{\varepsilon}/E}{\Delta G/G} = e_{\alpha} + e_{\beta} + e_{\gamma} + e_{\delta} + e_{\varepsilon}. \quad (15)$$

式中:农业经济增长和农业碳排放量的脱钩效应  $e$  被分解为 5 个效应<sup>[22]</sup>,即农业碳排放强度效应  $e_{\alpha}$ 、农业产业结构效应  $e_{\beta}$ 、农业经济水平效应  $e_{\gamma}$ 、城镇化水平效应  $e_{\delta}$ 、农业人口规模效应  $e_{\varepsilon}$ 。同理,农业经济增长与农业净碳汇量的耦合效应也可以分解成这 5 个效应,其中农业碳排放强度效应调整为农业碳汇强度效应。

### 1.3 数据来源与处理

本研究界定的西北地区是中国七大地理分区之一,包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区<sup>[23]</sup>,注意其与西北干旱区(包括新疆维吾尔自治区、甘肃省

河西走廊、青海省祁连山地区、内蒙古自治区阿拉善高原及黄河宁夏段以西的宁夏回族自治区部分<sup>[24]</sup>)的分区差异。相关数据来源于《中国农业统计资料》(2000—2015)、《中国统计年鉴》(1996—2016)、各省(市、区)《统计年鉴》(1996—2016),以各省(市、区)化肥折纯量、农药农膜使用量、有效灌溉面积、水稻种植面积、农用柴油计算碳排放量;各省(市、区)第一产业生产总值来源于各省(区)统计年鉴,为保证农业经济产值数据的纵向可比性,各省(区)农林牧渔业总产值均按 1990 年基准价格换算后使用。由于畜禽饲养周期的不同,须要根据畜禽出栏率对年平均饲养量进行调整,本研究参照政府间气候变化专门委员会(IPCC)的调整公式对饲养周期小于 1 年的生猪、家禽的年均饲养量进行调整。在测算过程中,为了方便汇总与比较分析,本研究将  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  统一置换成标准 C,依据 IPCC 第 4 次评估报告可知,1 t  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  所引发的温室效应分别相当于 25 t  $\text{CO}_2$ (约合 6.818 t C)和 298 t  $\text{CO}_2$ (约合 81.273 t C)。

## 2 实证结果与分析

### 2.1 西部地区农业碳排放与碳汇效应分析

依据农业碳排放量和碳汇量测算公式及相关统计数据,计算出 1995—2015 年西北地区农业碳排放量和碳汇量效应变动趋势(图 1、图 2)。

西北地区农业碳排放总量整体呈现上升趋势,从 1995 年的 1 998.069 万 t 增长到 2015 年的 2 937.876 万 t,增幅为 47.775%,年均递增 1.972%。由图 1 可知,西北地区总碳排放量呈现 2 个时段的连续增长,1995—2005 年碳排放量增长了约 500 万 t,2006—2015 年碳排放量增长了约 600 万 t。分省域来看,新疆维吾尔自治区的农业碳排放量在整个时期居于首位,占总碳排放量的 30% 以上;陕西省和甘肃省是第二大农业碳排放省份,2005 年以前 2 省的碳排放量差距较小,均约保持在 450 万~500 万 t,自 2005 年以后,2 省农业碳排放量持续增长,且甘肃省碳排放量明显高于陕西省,2015 年甘肃省碳排放量比陕西省高出 160 万 t;青海省农业碳排放量较小,且是唯一的农业碳排放量负增长的省份,碳排放量下降幅度为 7.880%;宁夏回族自治区农业碳排放量最小,但增长迅速,年均增长速度位列 5 省(区)第一,达到 3.585%。

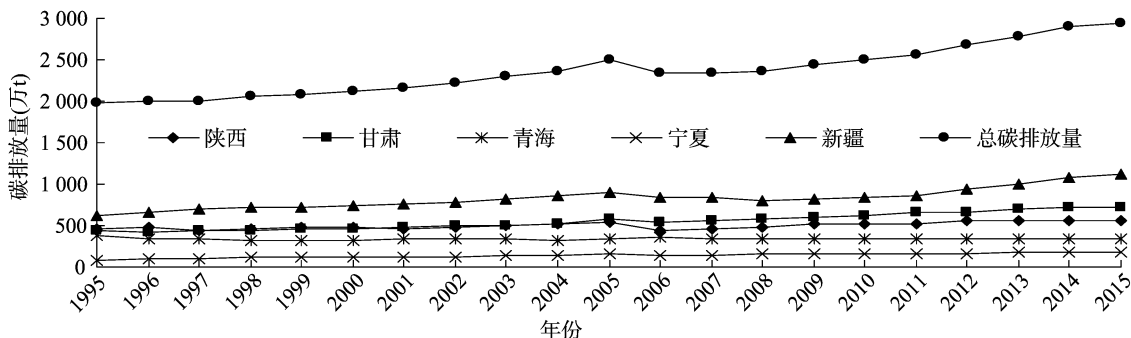


图1 1995—2015 年西北各省农业碳排放量

由图 2 可知,西北地区农业净碳汇量呈波动上升趋势,2015 年达到 3 189.965 万 t,比 1995 年的 830.186 万 t 增长了 284.247%,年均递增 6.962%。西北地区农业净碳汇量表现出阶段性特征,1995—1998 年净碳汇量快速波动增长,

1999—2005 年净碳汇量下降并保持在较低水平,2006—2012 年净碳汇量持续平稳增长,2013—2015 年净碳汇量维持在约 3 100 万 t,变化幅度小。从省域差异来看,新疆维吾尔自治区是农业碳汇大省,其农业净碳汇量在整个时期都超过其他 4

省(区)的总和,2015 年净碳汇量为 2 035.042 万 t,占西北地区农业总净碳汇的 63.795%;陕西省农业净碳汇量仅次于新疆维吾尔自治区,但由于增速较低,2007 年以后其净碳汇量与新疆维吾尔自治区的差距逐渐扩大,2015 年为 798.595 万 t,不足新疆维吾尔自治区的 1/2;甘肃省农业净碳汇量经历了“上升—

下降—上升”3 个阶段,2015 年净碳汇量为 395.561 万 t,约为陕西省的 1/2;宁夏回族自治区农业净碳汇量小,波动幅度小,整个时期净碳汇量都没有突破 200 万 t;青海省是唯一出现碳排放量大于碳汇量的省份,其净碳汇量维持在负 220 万 t 水平上。

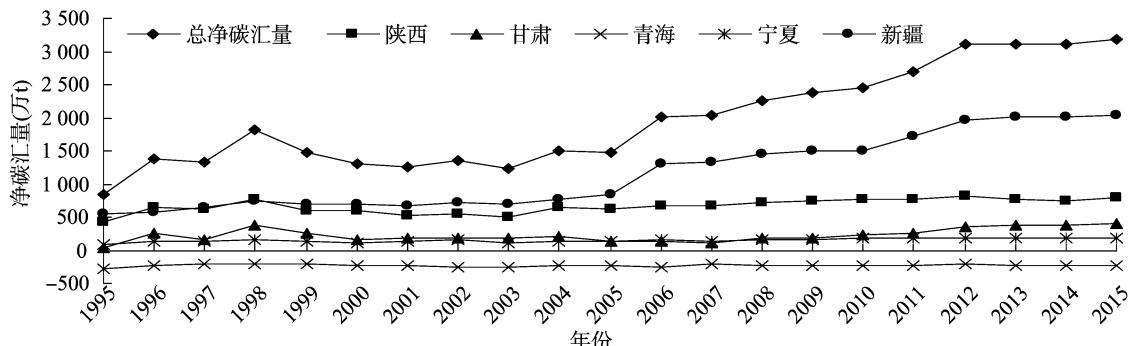


图2 1995—2015 年西北各省(区)农业净碳汇量

## 2.2 西北地区低碳农业联合生产强度分析

2.2.1 农业碳排放脱钩效应特征分析 综上碳排放测算结果和脱钩弹性计算公式(5),得出西北地区 1995—2015 年农业碳排放量变化与农业经济增长之间的脱钩关系(图 3)。从时间跨度来看,1995—1998 年脱钩弹性系数较小,农业碳排放量增长速度明显慢于农业产值增长速度;1999—2005 年脱钩弹性系数波动增长,表明随着农业产值的增加,农业碳排放量增长速度有所上升;2006—2008 年脱钩状态最好,农业发展带来的碳排放量很少,甚至出现负增长;2009—2015 年脱钩弹性系数普遍较大,碳排放量增长速度较前一阶段明显提高。整个时期内,西北地区脱钩弹性系数均低于 0.8,波动幅

度较小,弱脱钩类型占绝大多数,仅在 2006 年出现碳排放量随农业经济增长而减少的强脱钩弹性关系,表明西北地区农业碳减排工作虽然取得了一定成效,但脱钩强度仍然不够,还须进一步强化各项减排措施。

从具体省(区)来看,青海省的脱钩效果是最理想的,平均脱钩系数为 -0.016,平均脱钩状态为强脱钩;陕西省、甘肃省受 1998 年涝灾影响,农业产值出现负增长,导致 2 省 1998—1999 年脱钩状态为负脱钩,剔除该异常年份,陕西省的平均脱钩指数为 -0.008,脱钩状态良好;甘肃、宁夏、新疆等省(区)的平均脱钩弹性指数均小于 0.8,平均脱钩状态为弱脱钩(表 4)。

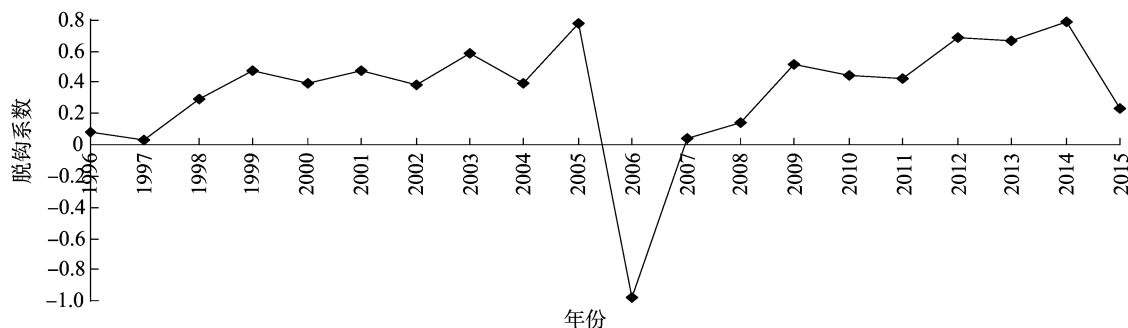


图3 1995—2015 年西北地区农业碳排放脱钩系数

2.2.2 农业碳汇耦合效应特征分析 1995—2015 年,西北地区农业净碳汇量与农业产值之间基本处于扩张耦合和强负耦合状态,2 种状态出现频率最高,且交替出现,表明农业产值与农业净碳汇量的关系不稳定;然而从耦合系数变化(图 4)可以看出,净碳汇量变化率与农业产值变化率的差异程度逐渐减小,未来农业净碳汇量与农业产值的关系将会逐渐稳定在弱耦合状态,即净碳汇量随农业经济增长而缓慢增长;整体上看,西北地区平均耦合系数为 0.534,平均耦合状态为弱耦合,说明农业经济与生态环境处于良性互动发展之中(图 4)。

就西北各省域耦合状态而言,各省(区)农业净碳汇量与农业经济耦合关系差异较大。新疆维吾尔自治区耦合状态最

好,平均耦合系数为 1.011,平均状态为增长连接,在整个时期内,农业产值持续增长,农业净碳汇量仅在少数年份出现了较小的负增长,农业净碳汇量以稍快于农业经济增长的速度在增加,表明新疆维吾尔自治区的农业发展带来了良好的环境效益;1998—1999 年的自然灾害对陕西省和甘肃省的农业生产影响较大,剔除该系数的影响后,陕西省的平均耦合系数为 0.269,甘肃省的平均耦合系数为 -0.193,陕西省与宁夏回族自治区的平均状态均为弱耦合状态,农业净碳汇量的增长速度慢于农业经济增长速度,表明 2 省(区)的农业发展具有较小的环境正外部效益;甘肃省和青海省的平均耦合系数均为负,表明在该时期内 2 省的农业净碳汇量随着农业经济的发展而减少,农业发展加剧了碳排放量和温室效应。

表 3 西北各省农业碳排放脱钩系数

| 年份        | 脱钩系数(脱钩状态)   |              |               |              |              |
|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
|           | 陕西           | 甘肃           | 青海            | 宁夏           | 新疆           |
| 1995—1996 | 0.545(弱脱钩)   | -0.314(强脱钩)  | -2.192(强脱钩)   | 0.207(弱脱钩)   | 1.240(扩张负脱钩) |
| 1996—1997 | -4.768(强脱钩)  | 5.115(扩张负脱钩) | -0.341(强脱钩)   | 1.498(扩张负脱钩) | 0.495(弱脱钩)   |
| 1997—1998 | 0.484(弱脱钩)   | 0.223(弱脱钩)   | -0.545(强脱钩)   | 1.420(扩张负脱钩) | 0.336(弱脱钩)   |
| 1998—1999 | -9.411(强负脱钩) | -1.304(强负脱钩) | -13.581(强脱钩)  | 1.045(增长连接)  | 0.176(弱脱钩)   |
| 1999—2000 | 0.325(弱脱钩)   | 0.383(弱脱钩)   | -0.867(强负脱钩)  | 0.186(弱脱钩)   | 0.357(弱脱钩)   |
| 2000—2001 | -0.940(强脱钩)  | 0.444(弱脱钩)   | 0.730(弱脱钩)    | 0.572(弱脱钩)   | 0.743(弱脱钩)   |
| 2001—2002 | 0.316(弱脱钩)   | 0.764(弱脱钩)   | 0.079(弱脱钩)    | 0.443(弱脱钩)   | 0.324(弱脱钩)   |
| 2002—2003 | 0.977(增长连接)  | 0.289(弱脱钩)   | -0.134(强脱钩)   | 0.273(弱脱钩)   | 0.844(增长连接)  |
| 2003—2004 | 0.554(弱脱钩)   | 0.120(弱脱钩)   | -0.833(强脱钩)   | 0.985(增长连接)  | 0.753(弱脱钩)   |
| 2004—2005 | 0.224(弱脱钩)   | 1.862(扩张负脱钩) | 0.635(弱脱钩)    | 1.126(增长连接)  | 0.625(弱脱钩)   |
| 2005—2006 | -2.377(强脱钩)  | -1.250(强脱钩)  | 17.573(扩张负脱钩) | -0.650(强脱钩)  | -0.708(强脱钩)  |
| 2006—2007 | 0.954(增长连接)  | 0.628(弱脱钩)   | -1.307(强脱钩)   | 0.328(弱脱钩)   | -0.159(强脱钩)  |
| 2007—2008 | 0.601(弱脱钩)   | 0.535(弱脱钩)   | 0.311(弱脱钩)    | 0.471(弱脱钩)   | -0.557(强脱钩)  |
| 2008—2009 | 1.170(增长连接)  | 0.577(弱脱钩)   | -0.001(强脱钩)   | 0.331(弱脱钩)   | 0.348(弱脱钩)   |
| 2009—2010 | 0.272(弱脱钩)   | 0.767(弱脱钩)   | 0.209(弱脱钩)    | 0.346(弱脱钩)   | 0.415(弱脱钩)   |
| 2010—2011 | 0.218(弱脱钩)   | 0.745(弱脱钩)   | -0.193(强脱钩)   | 0.229(弱脱钩)   | 0.555(弱脱钩)   |
| 2011—2012 | 1.124(增长连接)  | 0.361(弱脱钩)   | -0.577(强脱钩)   | 0.400(弱脱钩)   | 1.110(增长连接)  |
| 2012—2013 | 0.142(弱脱钩)   | 0.668(弱脱钩)   | 0.708(弱脱钩)    | 0.948(增长连接)  | 0.824(增长连接)  |
| 2013—2014 | -0.023(强脱钩)  | 0.869(增长连接)  | 0.006(弱脱钩)    | 0.460(弱脱钩)   | 1.345(扩张负脱钩) |
| 2014—2015 | 0.044(弱脱钩)   | 0.092(弱脱钩)   | 0.009(弱脱钩)    | 0.120(弱脱钩)   | 0.451(弱脱钩)   |
| 平均数       | -0.008*(强脱钩) | 0.644*(弱脱钩)  | -0.016(强脱钩)   | 0.537(弱脱钩)   | 0.476(弱脱钩)   |

注: \* 表示陕西省、甘肃省脱钩系数均值中剔除了 1998—1999 年的异常结果。表 4 同。

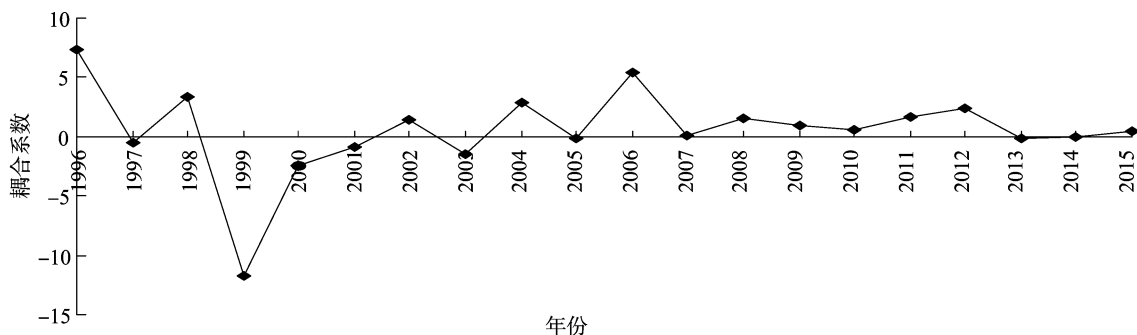


图4 1995—2015 年西北地区农业净碳汇量耦合系数

## 2.3 西北地区联合生产强度的影响因素分析

2.3.1 农业碳脱钩效应分解分析 根据上述对农业碳排放脱钩的 LMDI 分解公式计算,结果见表 5。由于在整个研究期内,西北地区农业总产值的变动率为正,若分解脱钩效应为负,则表明该指标的变化对农业碳排放脱钩具有促进作用,反之,则具有抑制作用。

总体来看,农业碳排放强度效应是决定西北地区脱钩状态的关键因素,其变动与脱钩指数的变化趋势基本一致,农业产业结构效应、农业人口规模效应对脱钩具有促进作用,而农业经济水平效应和城镇化水平效应对脱钩具有抑制作用。1995—1998 年农业碳排放强度效应对脱钩状态的促进作用明显,直接决定了脱钩系数的大小;1999 年开始农业碳排放强度效应的贡献率有所下降,脱钩系数的大小主要受农业产业结构效应的影响;2006—2011 年农业碳排放强度效应的贡献率又一次上升,成为决定脱钩系数的关键因素,而在此期间农业产业结构效应对脱钩呈现抑制作用,导致脱钩系数自 2009 年开始有所上升;2011 年之后脱钩系数的大小主要受城

镇化水平效应的影响,脱钩系数进一步增大。西北地区应着力减少单位农业产值的碳排放量,以提高农业碳排放强度,促进碳脱钩;同时也应合理调整农业产业结构,加强其对碳脱钩的促进作用;在城镇化建设过程中更加注重抑制各类农业碳排放,降低城镇化水平提高对碳脱钩的抑制作用。

从各省(区)来看,农业碳强度效应总体上均对碳脱钩具有促进作用,陕西省的贡献率最高,其次是新疆维吾尔自治区和甘肃省,青海省和宁夏回族自治区较低;农业产业结构效应除甘肃省外,均对碳脱钩呈现促进作用,其中青海省的贡献率最高;农业经济发展水平效应抑制了各省(区)碳脱钩,陕西省的抑制作用最强,其次是甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区,青海省最低;城镇化水平效应对各省(区)碳脱钩产生抑制作用,青海省抑制作用最明显;农业人口规模效应除新疆维吾尔自治区外,均对碳脱钩有促进作用,但贡献率相对较小。陕西省应更多应用低碳生产技术来发展农业,以提高农业碳排放强度,降低农业经济发展对碳脱钩的抑制作用;青海省对碳脱钩影响最大的是农业产业结构和城镇化水平,

表 4 西北各省农业净碳汇耦合系数

| 年份        | 耦合系数(耦合状态)     |               |              |              |              |
|-----------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 陕西             | 甘肃            | 青海           | 宁夏           | 新疆           |
| 1995—1996 | 4.571(扩张耦合)    | 60.052(扩张耦合)  | -3.868(强负耦合) | 2.265(扩张耦合)  | 1.162(增长连接)  |
| 1996—1997 | -3.426(强负耦合)   | -81.752(强负耦合) | -0.807(强负耦合) | -0.136(强负耦合) | 1.463(扩张耦合)  |
| 1997—1998 | 2.959(扩张耦合)    | 7.348(扩张耦合)   | -1.654(强负耦合) | 1.592(扩张耦合)  | 1.293(扩张耦合)  |
| 1998—1999 | 119.421(衰退负耦合) | 31.788(衰退负耦合) | -2.191(强负耦合) | -1.464(强负耦合) | -1.080(强负耦合) |
| 1999—2000 | -0.159(强负耦合)   | -8.004(强负耦合)  | -7.406(强耦合)  | -5.958(强负耦合) | 0.176(弱耦合)   |
| 2000—2001 | -4.142(强负耦合)   | 1.861(扩张耦合)   | -0.091(强负耦合) | 1.827(扩张耦合)  | -1.128(强负耦合) |
| 2001—2002 | 0.411(弱耦合)     | 0.880(增长连接)   | 0.852(增长连接)  | 2.539(扩张耦合)  | 1.781(扩张耦合)  |
| 2002—2003 | -1.228(强负耦合)   | -0.688(强负耦合)  | 0.444(弱耦合)   | -2.535(强负耦合) | -0.936(强负耦合) |
| 2003—2004 | 2.898(扩张耦合)    | 1.471(扩张耦合)   | -1.750(强负耦合) | 0.434(弱耦合)   | 2.012(扩张耦合)  |
| 2004—2005 | -0.291(强负耦合)   | -4.692(强负耦合)  | 0.256(弱耦合)   | 0.072(弱耦合)   | 1.173(增长连接)  |
| 2005—2006 | 0.824(增长连接)    | -0.293(强负耦合)  | 12.778(扩张耦合) | 3.768(扩张耦合)  | 7.523(扩张耦合)  |
| 2006—2007 | -0.024(强负耦合)   | -1.700(强负耦合)  | -2.604(强负耦合) | -1.576(强负耦合) | 0.105(弱耦合)   |
| 2007—2008 | 0.945(增长连接)    | 6.005(扩张耦合)   | 1.289(扩张耦合)  | 0.829(增长连接)  | 1.495(扩张耦合)  |
| 2008—2009 | 0.883(增长连接)    | 2.080(扩张耦合)   | -0.175(强负耦合) | 1.129(增长连接)  | 0.692(弱耦合)   |
| 2009—2010 | 0.462(弱耦合)     | 3.899(扩张耦合)   | 0.153(弱耦合)   | 0.825(增长连接)  | 0.059(弱耦合)   |
| 2010—2011 | 0.233(弱耦合)     | 1.046(增长连接)   | -0.387(强负耦合) | 0.308(弱耦合)   | 2.015(扩张耦合)  |
| 2011—2012 | 0.726(弱耦合)     | 6.998(扩张耦合)   | -1.346(强负耦合) | 1.368(扩张耦合)  | 1.895(扩张耦合)  |
| 2012—2013 | -0.995(强负耦合)   | 0.516(弱耦合)    | 1.465(扩张耦合)  | -0.975(强负耦合) | 0.277(弱耦合)   |
| 2013—2014 | -0.562(强负耦合)   | 0.279(弱耦合)    | 0.039(弱耦合)   | 0.491(弱耦合)   | 0.074(弱耦合)   |
| 2014—2015 | 1.288(扩张耦合)    | 0.831(增长连接)   | 0.176(弱耦合)   | 0.358(弱耦合)   | 0.176(弱耦合)   |
| 平均数       | 0.269*(弱耦合)    | -0.193*(强负耦合) | -0.241(强负耦合) | 0.258(弱耦合)   | 1.011(增长连接)  |

表 5 西北地区碳脱钩效应分解

| 年份        | 总脱钩系数  | 平均效应    |        |        |        |         |
|-----------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
|           |        | 农业碳排放强度 | 农业产业结构 | 农业经济水平 | 城镇化水平  | 农业人口规模  |
| 1995—1996 | 0.078  | -1.178  | 0.294  | 0.826  | 0.465  | -0.330  |
| 1996—1997 | 0.030  | -0.845  | -0.105 | 0.710  | 1.678  | -1.408  |
| 1997—1998 | 0.298  | -0.775  | 0.108  | 0.863  | 0.529  | -0.428  |
| 1998—1999 | 0.473  | -0.332  | -0.191 | 0.387  | 1.055  | -0.447  |
| 1999—2000 | 0.390  | -0.301  | -0.296 | 0.764  | -8.274 | 8.496   |
| 2000—2001 | 0.477  | -0.494  | -0.017 | 0.848  | 0.258  | -0.118  |
| 2001—2002 | 0.388  | -0.382  | -0.213 | 0.868  | 0.245  | -0.130  |
| 2002—2003 | 0.584  | -0.062  | -0.342 | 0.877  | 0.282  | -0.171  |
| 2003—2004 | 0.398  | -0.660  | 0.079  | 0.898  | 0.221  | -0.141  |
| 2004—2005 | 0.783  | -0.181  | -0.029 | 0.885  | 0.258  | -0.150  |
| 2005—2006 | -0.976 | -1.910  | -0.004 | 0.839  | 0.318  | -0.219  |
| 2006—2007 | 0.040  | -0.965  | 0.033  | 0.858  | 0.293  | -0.179  |
| 2007—2008 | 0.137  | -0.857  | 0.024  | 0.885  | 0.212  | -0.127  |
| 2008—2009 | 0.517  | -0.563  | 0.092  | 0.888  | 0.268  | -0.168  |
| 2009—2010 | 0.440  | -0.632  | 0.088  | 0.891  | 0.840  | -0.764  |
| 2010—2011 | 0.420  | -0.742  | 0.179  | 0.896  | 0.380  | -0.292  |
| 2011—2012 | 0.688  | -0.290  | -0.012 | 0.893  | 0.478  | -0.381  |
| 2012—2013 | 0.672  | -0.265  | -0.055 | 0.884  | 0.372  | -0.264  |
| 2013—2014 | 0.789  | -0.215  | 0.010  | 0.874  | 0.482  | -0.362  |
| 2014—2015 | 0.229  | -0.864  | 0.114  | 0.800  | 0.459  | -0.280  |
| 平均数       | 0.343  | -0.626  | -0.012 | 0.832  | 0.455* | -0.317* |

注：\*表示数据略去了2000年人口统计口径变化的影响。下同。

应着手从调整农业产业结构、规划城镇化进程来促进农业碳排放进一步脱钩;甘肃省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区的农业经济水平效应对脱钩的抑制作用较强,而农业碳排放强度效应对脱钩的促进作用相对较小,表明3省(区)应提

高农利用物资的使用效率,发展精细农业生产方式,降低单位产值的农业碳排放来促进碳脱钩(表6)。  
2.3.2 农业碳耦合效应分解分析 按照对农业碳排放脱钩的分解,同样将农业净碳汇耦合分解为5个效应(表7)。西

表 6 西北各省(区)碳脱钩效应分解

| 省份 | 平均效应值   |        |        |         |          |
|----|---------|--------|--------|---------|----------|
|    | 农业碳排放强度 | 农业产业结构 | 农业经济水平 | 城镇化水平   | 农业人口规模   |
| 陕西 | -1.152  | -0.305 | 1.059  | 0.461 * | -0.549 * |
| 甘肃 | -0.440  | 0.035  | 0.867  | 0.274   | -0.158   |
| 青海 | -0.308  | -0.686 | 0.414  | 0.659   | -0.094   |
| 宁夏 | -0.284  | -0.163 | 0.772  | 0.271 * | -0.086 * |
| 新疆 | -0.473  | -0.034 | 0.697  | 0.244 * | 0.003 *  |

北地区农业总产值的变动率为正,因此若分解耦合效应为正,则表明该指标的变化对农业净碳汇耦合具有促进作用,反之,则具有抑制作用。各省(区)中因青海省净碳汇量为负值,不能作对数变化,所以无法对其农业净碳汇耦合系数进行分解分析,故暂不予以分析。西北地区农业碳汇强度与农业净碳汇耦合系数的变化趋势基本一致,对耦合状态具有决定性作用;其余因素中,除农业产业结构、农业人口规模外,均对农业净碳汇耦合具有正向作用。农业产业结构效应对耦合状态呈现正负作用交替,但总体上对耦合系数的影响较小;农业经济

水平效应在整个时期均促进了净碳汇耦合,其贡献率基本稳定在 0.8 左右,1999 年达到最低值;城镇化水平效应对耦合的促进作用相对较小,2000—2009 年贡献率保持在较低水平;农业人口规模效应对耦合具有抑制作用,其贡献率变化幅度不大,对耦合系数的影响较小。西北地区的农业经济发展和城镇化进程产生了正的环境效益,应该继续保持这一良好态势,合理调整农业产业结构、合理规划城镇化建设,增加单位产值的净碳汇量,促进耦合状态的改善。

表 7 西北地区碳耦合效应分解

| 年份        | 总耦合系数   | 平均效应    |        |        |         |          |
|-----------|---------|---------|--------|--------|---------|----------|
|           |         | 农业碳汇强度  | 农业产业结构 | 农业经济水平 | 城镇化水平   | 农业人口规模   |
| 1995—1996 | 7.347   | 5.723   | 0.381  | 1.069  | 0.601   | -0.427   |
| 1996—1997 | -0.511  | -1.377  | -0.104 | 0.702  | 1.659   | -1.392   |
| 1997—1998 | 3.353   | 2.116   | 0.124  | 0.996  | 0.611   | -0.494   |
| 1998—1999 | -11.786 | -12.511 | -0.172 | 0.349  | 0.950   | -0.402   |
| 1999—2000 | -2.485  | -3.129  | -0.276 | 0.714  | -7.726  | 7.934    |
| 2000—2001 | -0.919  | -1.859  | -0.017 | 0.820  | 0.250   | -0.114   |
| 2001—2002 | 1.411   | 0.619   | -0.219 | 0.893  | 0.252   | -0.134   |
| 2002—2003 | -1.534  | -2.141  | -0.321 | 0.824  | 0.264   | -0.160   |
| 2003—2004 | 2.822   | 1.673   | 0.086  | 0.976  | 0.240   | -0.153   |
| 2004—2005 | -0.141  | -1.072  | -0.028 | 0.856  | 0.249   | -0.145   |
| 2005—2006 | 5.457   | 4.329   | -0.005 | 1.013  | 0.384   | -0.264   |
| 2006—2007 | 0.120   | -0.887  | 0.033  | 0.860  | 0.293   | -0.179   |
| 2007—2008 | 1.570   | 0.525   | 0.025  | 0.930  | 0.223   | -0.133   |
| 2008—2009 | 0.980   | -0.113  | 0.094  | 0.898  | 0.271   | -0.170   |
| 2009—2010 | 0.566   | -0.510  | 0.088  | 0.894  | 0.843   | -0.749   |
| 2010—2011 | 1.643   | 0.440   | 0.185  | 0.927  | 0.393   | -0.303   |
| 2011—2012 | 2.364   | 1.334   | -0.012 | 0.940  | 0.502   | -0.401   |
| 2012—2013 | -0.090  | -1.007  | -0.054 | 0.865  | 0.364   | -0.259   |
| 2013—2014 | -0.009  | -0.991  | 0.010  | 0.855  | 0.471   | -0.354   |
| 2014—2015 | 0.516   | -0.586  | 0.115  | 0.806  | 0.463   | -0.282   |
| 平均数       | 0.534   | -0.471  | -0.003 | 0.859  | 0.464 * | -0.326 * |

分省域来看,除宁夏回族自治区外,农业碳汇强度效应均对耦合具有促进作用,陕西省的贡献率明显高于其他 3 省(区);除甘肃省外,农业产业结构效应均对耦合具有较小的抑制作用;各省(区)农业经济水平效应、城镇化水平均正向作用于碳耦合,且前者的贡献率明显高于后者;除新疆维吾尔自治区外,农业人口规模效应均对耦合有负向影响。陕西省农业人口规模效应、农业产业结构效应对耦合的抑制作用明显,应适当调整农、林、牧、渔业的比例,引导农村劳动力有序转移,避免出现农村空心化现象;甘肃省农业碳汇强度效应对耦合的促进作用较小,而农业人口规模效应的抑制作用较大,应在机械替代劳动力的过程中更加注重规模化效益,积极促

进农业发展朝着更绿色环保的方向迈进,增加单位产值的净碳汇量;宁夏回族自治区农业碳汇强度效应总体为负,应着力增加农业碳汇强度来促进耦合;新疆维吾尔自治区除农业产业结构效应外,其余因素均促进了耦合,说明新疆维吾尔自治区应协调农业产业结构,进一步促进耦合状态优化(表 8)。

3 结论与启示

3.1 结论

综上分析可知,第一,低碳农业生产过程是经济产品和碳产品的联合生产过程,采用联合生产强度衡量低碳农业发展与经济增长的关系更加精确、合理,其中联合生产强度以农业

表 8 西北各省(区)碳耦合效应分解

| 省份 | 平均效应值  |        |        |         |          |
|----|--------|--------|--------|---------|----------|
|    | 农业碳汇强度 | 农业产业结构 | 农业经济水平 | 城镇化水平   | 农业人口规模   |
| 陕西 | 5.512  | -0.262 | 1.049  | 0.580 * | -0.655 * |
| 甘肃 | 0.214  | 0.073  | 0.993  | 0.280   | -0.164   |
| 宁夏 | -0.582 | -0.146 | 0.777  | 0.269 * | -0.083 * |
| 新疆 | 0.041  | -0.033 | 0.713  | 0.245 * | 0.007 *  |

净碳汇耦合表示。第二,1995—2015 年期间西北地区农业碳排放量呈现两阶段连续增长态势,农业净碳汇量则经历了“波动增长—低谷—持续增长”的变化趋势。第三,利用脱钩模型测算出西北地区农业碳脱钩状态为弱脱钩,其中青海省脱钩状态最理想,耦合模型测算出西北地区农业净碳汇与农业经济增长表现为扩张与强负耦合状态交替,各省(区)5 个效应存在地区差异。

3.2 政策启示

第一,发展低碳农业要注重提高农业生产效率,降低单位农业产值的碳排放量,要转变农业生产方式,提高农用物资的利用效率。如推广泡腾剂、水乳剂等新剂型农药的使用,推广绿色防控技术,降低农药使用量;推广测土配方技术,通过土壤深耕、增施有机肥、农家肥等手段提高土壤肥力,降低化肥使用量。第二,合理的农业产业结构是低碳农业发展的支撑条件,各省(区)应依据自身实际的地理、气候、土壤条件与经济发展水平等因素,综合考虑探索出符合各地经济社会发展规律的农业发展道路。要根据市场需求合理安排农、林、牧、渔业比例,将种植业生产环节与畜牧业结合,发展循环农业,提高农作物秸秆、牲畜粪便的利用率,减少农业废弃物碳排放。第三,改善农业生产条件有利于农业低碳化发展,从改善农田基础设施建设着手,加强对中低产农田的改造,提高土壤肥力;推广小型农田水利设施建设,提高农业应对旱涝灾害的能力;鼓励有条件的地方推广喷灌、滴灌等节水灌溉技术,建立健全乡(镇)农业技术推广服务站,有力开展低碳农业技术推广,提高农业生产的科技水平。第四,低碳农业的发展离不开农民生活方式和消费观念的转变,政府应加强对低碳农业、低碳生活方式的宣传教育,让低碳走进农村,让农民接触、了解低碳,倡导农民在日常生活中注重节约能源、保护环境,从点滴做起汇聚环保正能量。

参考文献:

[1]董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报,2008,24(10):269-273.

[2]姚成胜,钱双双,李政通,等. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学,2017,39(4):698-712.

[3]陈罗焯,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(4):596-607.

[4]Westerlund J,Basher S A. Testing for convergence in carbon dioxide emissions using a century of panel data[J]. Environmental and Resource Economics,2008,40(1):109-120.

[5]田 云,张俊飏,李 波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较

及脱钩效应[J]. 资源科学,2012,34(11):2097-2105.

[6]马蓓蓓,鲁春霞,张 雷,等. 新形势下西北地区碳排放及低碳化发展研究——以陕西省为例[J]. 资源科学,2010,32(2):223-229.

[7]冉锦成,马惠兰,苏 洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J]. 江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.

[8]张振龙,孙 慧,苏 洋. 中国西北干旱地区农牧业生态系统碳排放的空间分布与演变趋势[J]. 生态学报,2017,37(16):5263-5272.

[9]李 波,张俊飏. 基于投入视角的我国农业碳排放与经济发展脱钩研究[J]. 经济经纬,2012(4):27-31.

[10]张玉梅,乔 娟. 都市农业发展与碳排放脱钩关系分析——基于脱钩理论的 Tapio 弹性分析法[J]. 经济问题,2014(10):81-86.

[11]王太祥,王 腾,吴林海. 西北干旱区农地利用碳排放与农业经济增长的响应关系[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(4):170-176.

[12]姜志德. 联合生产视角下的退耕还林生态补偿机制创新[J]. 甘肃社会科学,2014(1):232-235.

[13]陈 儒,姜志德. 中国低碳农业发展绩效与政策评价[J]. 华南农业大学学报(社会科学版),2017,16(5):28-40.

[14]Multifunctionality: towards an Analytical Framework[M]. Paris: OECD,2001.

[15]陈 儒,姜志德,姚顺波. 低碳农业联合生产的绩效评估及其影响因素分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2018(3):44-55,154-155.

[16]闵继胜,胡 浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.

[17]蔡博峰. 中国温室气体清单研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2014.

[18]田 云,张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.

[19]Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy,2005,12(2):137-151.

[20]杨 果,陈 瑶. 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(12):171-176.

[21]Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC,1989.

[22]史常亮,揭昌亮,朱俊峰. 中国农业能耗碳排放脱钩的影响因素解析[J]. 产经评论,2016(4):116-126.

[23]黄小燕,李耀辉,冯建英,等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报,2015,35(5):1359-1370.

[24]姚俊强,杨 青,陈亚宁,等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志,2013,32(5):1283-1291.