

# 农业生产项目的综合碳效应分析与核算研究

——基于陕西安塞的农户调查数据

陈 儒<sup>1</sup>, 邓 悦<sup>2</sup>, 姜志德<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨陵 712100;

2.西北农林科技大学 人文社会发展学院, 陕西 杨陵 712100)



**摘 要** 通过构建农户层面碳效应分析框架和测算体系,结合实地调研获取的农户数据,量化分析了农户农业生产项目上的综合碳效应。研究表明:综合碳效应因项目不同而差异明显,且具体项目分布特征各异。碳排放效应主要集中在玉米、茄子、苹果、刺槐、羊生产项目上,具体体现在农资投入、农业能源投入、农田地利用、农业废弃物处理、畜禽饲养五个生产环节,以化肥、粪肥、农药、农膜投入和作物秸秆、薪柴燃烧排放为主,针对性地开展农业温室气体减排工作,将有助于提高减排效率;碳汇效应源于植被层、枯落物层和土壤层固碳,其中 79.17%的碳汇量源于土壤层固碳,92.38%的碳汇量集中在生态林草类项目上,且该项目碳生态效率最优;畜禽养殖项目碳经济效率最优,饲料作物种植产生的碳汇量很好的抵消了该项目碳排放量;草本经济作物类项目碳生产效率最优,但碳排放强度和密度最大,导致该类项目净碳汇量总计亏损 136.498 吨碳;除草本经济作物外,其他项目均表现出正的净碳汇效应,以生态林草类项目贡献最为突出,农业生产项目整体净碳汇效应良好。

**关键词** 生产项目;综合碳效应;农户数据;核算

**中图分类号:**F 323.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-3456(2017)03-0023-12

**DOI 编码:**10.13300/j.cnki.hnwkxb.2017.03.004

农业活动已成为温室气体排放的第二大重要来源,在全球温室气体的排放总量中农业源温室气体占 14.9%<sup>[1]</sup>,在我国温室气体排放总量中农业源温室气体约占 17%<sup>[2]</sup>,所以人类活动产生的温室气体是导致气候变化的罪魁祸首。近年来,我国实施的一些大型生态治理工程很好地支持了应对气候变化的工作,譬如退耕还林工程通过恢复植被、保持水土而显示了碳汇效应,抵消了因农业生产集约化导致的碳排放增加,为农业温室气体减排做出了不可磨灭的贡献。农业层面上如此宏观的碳效应实乃根植于微观农户农业生产项目碳效应的“集成”,是千万个农户生产模式转变的“涌现”,对农户农业生产项目碳效应的研究将成为农业温室气体减排的关键突破口。

目前,对于农业生产活动碳效应的分析与核算,现有文献较多从宏观农业层面、中观农业产业以及具体农业项目尺度进行研究。在宏观农业视角上,闵继胜等通过构建相应的指标体系,测算了中国农业生产的温室气体排放量,全面分析了宏观大农业层面的碳排放效应<sup>[3]</sup>,田云等、陈罗焯等基于时空视角,测算分析了中国农业净碳汇效应变化趋势<sup>[4-5]</sup>;还有部分学者基于中观农业产业视角,分别测算分析了林业层<sup>[6]</sup>、种植业层<sup>[7]</sup>及畜牧业层面<sup>[8-9]</sup>等相关碳效应;从具体农业项目尺度进行碳效应分析与核算的相关研究成果更为丰硕,涵盖了小麦、稻田、玉米、奶牛等诸多农业项目<sup>[10-12]</sup>,均从不同角度剖析了微观单一农业生产项目所产生的碳效应。然而,在农业碳排放量、碳汇及净碳汇量核算方

收稿日期:2017-01-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目“低碳农业的联合生产绩效与行为机制研究”(71573212);中国清洁发展机制基金赠款项目“黄土高原退耕区农户低碳生产模式与政策研究”(2012027)。

作者简介:陈 儒(1991-),男,博士研究生;研究方向:生态农业、低碳经济。

通讯作者:姜志德(1964-),男,教授,博士;研究方向:农业资源经济与环境管理、低碳经济。

面,由于缺乏一套完整的碳效应分析框架,不同学者构建的测算体系也是参差不齐,导致相应的测算结果相差悬殊,对农业碳效应的解释也不尽相同,但归根到底来讲,无论是宏观农业层面、中观农业产业,还是具体农业项目,其农业碳效应的本质均源自于千万农户生产项目的“集体产出”,是无数农户单元碳效应的累积。因此,必须要深入到农户层面上开展农业碳效应分析与核算研究,才能从根本上挖掘农业碳效应的影响因素、特征差异及存在问题。然而目前,只有少部分学者基于微观农户数据对农业碳效应进行粗略估算<sup>[2]</sup>,且研究目的并非落脚于农户农业生产项目的碳效应分析与核算上,尚未形成一套在农户层面上按农业生产项目进行的碳效应分析框架和测算体系。

鉴于此,本文从微观层面以农户及其具体生产项目为研究对象,开展农业生产项目综合碳效应分析与核算研究,通过构建农户层面碳效应分析框架和测算体系,结合实地调研获取的农户数据,量化分析农户农业生产项目上的综合碳效应;在此基础上,深入剖析特定农业生产项目中各碳效应的影响源,并明确综合碳效应在农业生产项目上的结构分布特征及差异。

## 一、农业生产项目的碳效应分析框架与核算方法

### 1. 农业综合碳效应构成

根据气候变化框架协定(UNFCCC)以及政府间气候变化专门委员会(IPCC)<sup>[13]</sup>的报告,按照农业生产活动所涉及的碳汇和碳源<sup>[14]</sup>,可以将农业生产活动分解为碳排放与碳吸收两大类,且由此所产生的碳库碳物质质量的变化,以及对区域内碳流通过程产生的影响,称之为农业碳效应。同时,依据方法体系测算出的碳汇量和碳排量,可以分析农业生产活动中的碳汇效应、碳减排效应、净碳效应、固碳效应<sup>[4,12]</sup>以及碳效率、碳强度<sup>[15-16]</sup>等一系列碳效应,最终构成农业综合碳效应。

### 2. 农业生产项目的碳效应分析框架

全面分析农业生产项目的碳效应关键取决于依据具体方法体系测算出的碳汇量和碳排量,对于碳排放量的测算,学界较多从农业能源、农用物资利用、牲畜肠道发酵、粪便管理、农田人为焚烧等方面进行测算<sup>[17]</sup>,碳汇量的测算主要源于生物量、死有机物质,以及土壤固碳<sup>[5]</sup>,但是在农户层面上按农业生产项目进行的碳效应分析框架和测算体系仍然十分缺乏,本文通过对陕西退耕区安塞县农户的生产经营项目进行调查分析,依据碳源和碳汇的产出途径及结构,构建了农业生产项目碳效应的分析框架,把农户的农业生产项目主要归为粮食作物、经济作物、生态林草、养殖四大类,其中粮食作物与草本经济作物均属于一年生或多年生草本植物,以农田地耕作为主或辅以农业设施,且生产要素投入密集,碳源和碳汇产出结构相似;木本经济作物较多栽植于园地、坡耕地等,农户需要投入大量生产要素获得相应的产出,而生态林与其最大的区别在于生态林生产要素投入较少,较多栽植于山地、荒地等,二者碳源、碳汇产出途径具有较大差异,需要分开而论。农户具体农业生产项目碳排放主要从农资投入、农地利用、农业能源、农业废弃物处理、肠道发酵、粪便管理以及一些特殊农作(养殖)方式等来测算,碳汇主要从生物量、死有机物质及土壤固碳来测算,并着重考虑作物品种、树木物理特征、种植密度等因素,具体分析框架如表 1 所示。

### 3. 农业生产项目的碳效应核算方法

(1)碳排放量的测算。针对农户农业生产项目碳排放量的计算,不同生产项目间碳排放结构相对比较复杂,不仅要充分考虑导致直接碳排放的生产环节,还需将间接或引致碳排放纳入其中,且排放过程贯穿于整个生产周期,很难就某一个环节单独进行计算,比较成熟的方法是直接采用排放系数,这也是 IPCC 推荐的方法<sup>[5]</sup>。同时,在排放因子的选取上要尽量结合国内学者的研究成果,着重考虑区域差异的影响,若无则采用 IPCC 相关推荐系数。本文在参考闵继胜、田云等学者<sup>[3-4]</sup>测算碳排放的方法基础之上,确定碳排放公式如下所示:

$$E = \sum E_i = \sum T_i \times \phi_i \quad (1)$$

式(1)中, $E$ 为农户所有项目碳排放总量, $E_i$ 为各种碳排放源的排放量, $i$ 为碳排放源类型, $T_i$ 为碳排放源的使用量, $\phi_i$ 为碳排放系数,各类碳排放源及其碳排放系数如表 2 所示。

表 1 农业生产项目的碳效应分析框架

| 大类   | 中类   | 小类       | 品种                      | 碳计量需考虑的因素   |   |                   |
|------|------|----------|-------------------------|---|---|-------------------|
|      |      |          |                         | 碳排放源  | 碳汇源                                       |                   |
| 粮食作物 | —    | 谷物       | 玉米、小麦等                  | 农资投入,包括化肥、农药、地膜等;农地利用,灌溉、翻耕、水淹等不同利用方式;农业废弃物处理,秸秆、地膜焚烧等行为;农业能源,与农业生产活动相关的能源投入,包括电、柴(汽)油、人工等此外,还需考虑有无农业设施(拱棚或者日光温室)及特殊农作方式等 | 植被生物量;不同土地利用方式导致的土壤固碳等;此外,并考虑作物品种、种植密度等   |                   |
|      |      | 豆类       | 大豆、红豆等                  |   |   |                   |
|      |      | 薯类       | 马铃薯、甘薯等                 |   |   |                   |
|      |      | 纤维类      | 棉花、麻类等                  |   |   |                   |
|      |      | 油料类      | 油菜、花生等                  |   |   |                   |
| 草本作物 | —    | 蔬菜类      | 豆角、番茄等                  |   |   |                   |
|      |      | 瓜果类      | 草莓、西瓜、甜瓜等               |   |   |                   |
|      |      | 花卉类      | 玫瑰、牡丹等                  |   |   |                   |
|      |      | 其他       | 烟叶等                     |   |   |                   |
| 经济作物 | 木本作物 | 木本果树     | 苹果、梨、核桃、杏等              | 参照粮食作物碳排放源,并考虑间作套种、地表覆盖等特殊农作方式  | 参照粮食作物碳汇源,并着重考虑树木物理特征(品种、树龄、株高、直径等)、种植密度等 |                   |
|      |      | 木本油料     | 花椒、油茶等                  |   |   |                   |
|      |      | 木本药材     | 杜仲、山茱萸等                 |   |   |                   |
| 生态林草 | 木本植物 | 其它       | 茶树、木本花卉等                | 参照粮食作物碳排放源  | 参照粮食作物碳汇源,并考虑地表枯落物等死有机物质                  |                   |
|      |      | 乔木类      | 松、柏、竹、刺槐等               |   |   |                   |
|      |      | 灌木类      | 柠条、沙棘、山桃等               |   |   |                   |
| 养殖类  | —    | 草本植物     | 百里香、针茅草等                | 参照粮食作物碳排放源  | 参照粮食作物碳汇源                                 |                   |
|      |      | 一般养殖     | 家畜类                     | 猪、羊、牛等  | 肠道发酵、粪便管理及相关能源投入(电、柴/汽油、人工)等              | 不同饲料作物植被生物量,土壤固碳等 |
|      |      |          | 家禽类                     | 鸡、鸭、鹅等  |   |                   |
|      |      |          | 水产类                     | 鱼、鳖、虾等  |   |                   |
| 特种养殖 | —    | 蛇、蝎、蚕、虫等 | 参照一般养殖碳排放源,并考虑有无特殊养殖方式等 | 参照一般养殖碳汇源   |   |                   |

表 2 各生产环节碳源项目的温室气体排放系数

| 核算内容                      | 核算子项目   | 排放系数  | 参考来源                        |
|---------------------------|---------|---|-----------------------------|
| 农资投入                      | 氮肥      | 3.932 kg C/kg   | 邓明君等 <sup>[18]</sup>        |
|                           | 磷肥      | 0.636 kg C/kg   | 陈舜等 <sup>[19]</sup>         |
|                           | 钾肥      | 0.180 kg C/kg   |                             |
|                           | 粪肥      | 1913.1 kg CO <sub>2</sub> /hm <sup>2</sup>                  | 周贝贝等 <sup>[20]</sup>        |
|                           | 农药      | 4.934 kg C/kg   | ORNL                        |
|                           | 农膜      | 5.180 kg C/kg   | IREEA                       |
|                           | 灌溉能源消耗  |   | 266.48 kg C/hm <sup>2</sup> |
| 农业能源投入                    | 柴油/汽油   | 20.20 kg C/GJ   | Solomon <sup>[13]</sup>     |
|                           | 电       | 0.92 kg C/kWh   | 陈罗焯等 <sup>[5]</sup>         |
|                           | 人工      | 0.25 kg C/天   | 陈琳等 <sup>[21]</sup>         |
| 农田地利用                     | 翻耕      | 312.6 kg C/km <sup>2</sup>                                  | 伍芬琳等 <sup>[22]</sup>        |
|                           | 稻田水淹    | 不同地区水稻生长周期内 CH <sub>4</sub> 排放率也不相同,具体参考闵继胜等 <sup>[3]</sup> |                             |
| 农田地土壤 N <sub>2</sub> O 排放 | 玉米      | 2.53 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
|                           | 水稻      | 0.24 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
|                           | 冬小麦     | 2.05 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
|                           | 春小麦     | 0.40 kg/hm <sup>2</sup>                                     | 田云等 <sup>[4]</sup>          |
|                           | 大豆      | 0.77 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
|                           | 蔬菜      | 4.21 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
| 农业废弃物处理                   | 其他旱地作物  | 0.95 kg/hm <sup>2</sup>                                     |                             |
|                           | 园地      | 4.50 kg/hm <sup>2</sup>                                     | 孙志强等 <sup>[23]</sup>        |
|                           | 农膜燃烧    | 依据 IPCC 推荐的废弃物焚烧公式和系数 <sup>[13]</sup>                       |                             |
|                           | 秸秆燃烧    | 1.39 kg CO <sub>2</sub> /kg                                 | 赵建宁等 <sup>[24]</sup>        |
|                           | 其他生物质燃烧 | 1.515 kg CO <sub>2</sub> /kg                                | Andreae 等 <sup>[25]</sup>   |

续表 2

| 核算内容  | 核算子项目 | 排放系数            |                  | 参考来源                       |
|---|-------|-----------------|------------------|----------------------------|
| 肠道发酵 CH <sub>4</sub> 排放                       | 奶牛    | 89.3 (kg/头·年)   |                  | 中国温室气体清单研究 <sup>[26]</sup> |
|   | 非奶牛   | 67.9 (kg/头·年)   |                  |                            |
|   | 绵羊    | 8.7 (kg/只·年)    |                  |                            |
|   | 山羊    | 9.4 (kg/只·年)    |                  |                            |
|   | 猪     | 1 (kg/只·年)      |                  |                            |
|   | 马     | 18 (kg/匹·年)     |                  |                            |
|   | 驴     | 10 (kg/头·年)     |                  |                            |
| 粪便管理<br>CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放 |       | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | 中国温室气体清单研究 <sup>[26]</sup> |
|   | 奶牛    | 5.93 (kg/头·年)   | 1.447 (kg/头·年)   |                            |
|   | 非奶牛   | 1.86 (kg/头·年)   | 0.545 (kg/头·年)   |                            |
|   | 绵羊    | 0.28 (kg/只·年)   | 0.074 (kg/只·年)   |                            |
|   | 山羊    | 0.32 (kg/头·年)   | 0.074 (kg/只·年)   |                            |
|   | 猪     | 1.38 (kg/只·年)   | 0.195 (kg/只·年)   |                            |
|   | 马     | 1.09 (kg/匹·年)   | 0.33 (kg/匹·年)    |                            |
|   | 驴     | 0.6 (kg/头·年)    | 0.188 (kg/头·年)   |                            |
|   | 家禽    | 0.01 (kg/只·年)   | 0.007 (kg/只·年)   |                            |

注:排放系数使用中注意 CO<sub>2</sub> 当量与 C 当量的区别。

(2)碳汇量的测算。碳汇是将温室气体从大气中移除的过程、活动或者机制<sup>[14]</sup>,通俗地说,当生态系统固定的碳量大于排放的碳量,该系统就形成净碳汇过程<sup>[27]</sup>,常用碳汇与碳源之间的差值来衡量。对于生态系统固定的碳量,学者基本从植被固碳、土壤固碳进行碳汇测算。针对农户农业生产项目层面碳汇量的计算,不同的生产项目需结合相关领域的研究成果来测算植被生物量、地表死有机物质、土壤有机碳等,具体项目测算方法如下:

①农作物固碳。农作物固碳指农作物生长周期内的碳吸收,是指作物通过光合作用形成的净初级生产量,即生物质产量<sup>[4]</sup>,计算式表示如下:

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

式(2)中, $C$  为农作物碳吸收总量, $C_{crop-i}$  为各类农作物的碳吸收量, $i$  为农作物类型, $c_i$  为农作物的碳吸收率, $Y_i$  为农作物产量, $r_i$  为相应农作物经济产品部分的含水量, $H_i$  为农作物经济系数。本文结合实地调研农户的生产情况,列出以下农作物的碳吸收率与经济系数参考值,如表 3 所示。

表 3 农作物的经济系数和碳吸收率

| 品种 | 经济系数 | 含水量  | 碳吸收率 | 品种 | 经济系数 | 含水量  | 碳吸收率 |
|----|------|------|------|----|------|------|------|
| 玉米 | 0.40 | 0.12 | 0.47 | 薯类 | 0.70 | 0.70 | 0.42 |
| 蔬菜 | 0.83 | 0.85 | 0.41 | 瓜类 | 0.70 | 0.90 | 0.45 |
| 谷子 | 0.39 | 0.17 | 0.45 | 豆类 | 0.34 | 0.13 | 0.45 |
| 糜子 | 0.46 | 0.17 | 0.45 | 其他 | 0.40 | 0.12 | 0.45 |

注:资料来源于田云等<sup>[4]</sup>。

②经济林草固碳。对于经济林草碳汇量的核算,通常采用生物量估算法,包括连续生物量转换因子法、生物量回归模型等,由于实地调研的农户以生产苹果为主,因此本文采用学者 Wu 等的研究成果<sup>[28]</sup>,运用异速生长模型计算林木生物量,并引入碳转化系数,换算成林木固碳量。其计算公式为:

$$C_{econ-t} = \sum A_a \rho_a [0.46 \times (W_{Ba} + W_{Sa} + W_{Ra} + W_{Fa}) + 0.176 \times W_{La}] \quad (3)$$

$$W_{Ba} = 0.124 \times D_a^{1.234} \quad (4)$$

$$W_{Sa} = 0.178 \times D_a^{1.101} \quad (5)$$

$$W_{Ra} = 0.159 \times D_a^{0.999} \quad (6)$$

$$W_{La} = 0.160 \times D_a^{0.656} \quad (7)$$

式(3)中, $C_{econ-t}$  为经济林草固碳量, $A_a$  为相应树龄果树的栽植面积, $\rho_a$  为栽植密度, $a$  为树龄, $W_{Ba}$ 、 $W_{Sa}$ 、 $W_{Ra}$ 、 $W_{Fa}$ 、 $W_{La}$  为树枝、干、根、果、叶的生物量干重,0.46、0.176 为碳转化系数, $D_a$  为不同树龄树木干径的平方。同时,除苹果外的其他经济林木生物量估算采用方精云等的研究成果<sup>[29]</sup>,采用

平均生物量密度为每公顷 23.7 吨的方法,并以 0.5 作为生物量的碳转换系数<sup>[30]</sup>。此外,农户在生产种植过程中为追求产量最大化会采取一系列锄草、拔草等管护行为,因此本研究不考虑园地中自然生长的草本植物、枯落物固碳。

③生态林草固碳。本文着重考虑农户调研的实际情况,结合相关领域的研究成果,采用植被碳储量等于植被层(乔木层、灌木层、草本层)和凋落物层的单位面积生物量与含碳率、种植面积的乘积之和来估算,计算式表示如下:

$$C_{eco-t} = \sum C_{eco-t-i} = \sum C_{\rho i} \times A_i \quad (8)$$

式(8)中, $C_{eco-t}$ 为生态林草固碳量, $C_{eco-t-i}$ 为各类生态林草的碳吸收量, $i$ 为生态林草类型, $C_{\rho i}$ 为不同类型林草的碳密度, $A_i$ 为林草的栽植面积。依据农户调研的实际生产情况,相应类型林草的碳密度如表4所示。

表4 不同类型林草的生物量密度、碳密度

| 类型   | 生物量密度                    | 碳密度                      |                         |                          | 备注                                | 参考来源                 |
|------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|
|      |                          | 植被层                      | 枯落物层                    | 土壤层                      |                                   |                      |
| 刺槐   | 3.12 kg/m <sup>2</sup>   | 13.10 Mg/hm <sup>2</sup> | 1.40 Mg/hm <sup>2</sup> | 55.20 Mg/hm <sup>2</sup> | 树龄 9 年                            | 艾泽民等 <sup>[31]</sup> |
|      | 2.81 kg/m <sup>2</sup>   | 12.50 Mg/hm <sup>2</sup> | 0.70 Mg/hm <sup>2</sup> | 65.70 Mg/hm <sup>2</sup> | 树龄 17 年                           |                      |
|      | 6.99 kg/m <sup>2</sup>   | 30.80 Mg/hm <sup>2</sup> | 1.10 Mg/hm <sup>2</sup> | 71.20 Mg/hm <sup>2</sup> | 树龄 30 年                           |                      |
|      | 10.45 kg/m <sup>2</sup>  | 46.00 Mg/hm <sup>2</sup> | 0.50 Mg/hm <sup>2</sup> | 81.40 Mg/hm <sup>2</sup> | 树龄 37 年                           |                      |
| 油松   | 14.91 t/hm <sup>2</sup>  | 3.87 t/hm <sup>2</sup>   | 1.57 t/hm <sup>2</sup>  | 65.05 t/hm <sup>2</sup>  | 树龄 9 年                            | 杨玉姣等 <sup>[32]</sup> |
|      | 70.92 t/hm <sup>2</sup>  | 27.47 t/hm <sup>2</sup>  | 6.15 t/hm <sup>2</sup>  | 66.85 t/hm <sup>2</sup>  | 树龄 23 年                           |                      |
|      | 131.09 t/hm <sup>2</sup> | 60.28 t/hm <sup>2</sup>  | 6.71 t/hm <sup>2</sup>  | 100.73 t/hm <sup>2</sup> | 树龄 33 年                           |                      |
|      | 162.4 t/hm <sup>2</sup>  | 62.36 t/hm <sup>2</sup>  | 9.43 t/hm <sup>2</sup>  | 72.47 t/hm <sup>2</sup>  | 树龄 47 年                           |                      |
| 沙棘   | 16.41 t/hm <sup>2</sup>  | 7.24 t/hm <sup>2</sup>   | —                       | 56.05 t/hm <sup>2</sup>  | —                                 | 刘涛等 <sup>[33]</sup>  |
| 山桃   | 16.19 t/hm <sup>2</sup>  | 9.77 t/hm <sup>2</sup>   | —                       | 68.01 t/hm <sup>2</sup>  | —                                 |                      |
| 柠条   | 27.26 t/hm <sup>2</sup>  | 6.45 t/hm <sup>2</sup>   | —                       | 46.37 t/hm <sup>2</sup>  | —                                 |                      |
| 杏    | 23.70 Mg/hm <sup>2</sup> | —                        | —                       | —                        | —                                 | 方精云等 <sup>[29]</sup> |
| 其他草地 | 749.31 g/m <sup>2</sup>  | 288.94 g/m <sup>2</sup>  | —                       | 3.88 kg/m <sup>2</sup>   | 生物量的碳含量引用<br>IPCC 缺省值 0.47kg C/kg | 课题组<br>实验数据          |

注:Mg 中 M 为数量级,倍数为 10<sup>6</sup>。

④土壤固碳。土壤固碳过程主要是由于枯枝落叶和动植物残体长期覆盖于地表,在气候、生物等因素的作用下,形成有机质含量丰富的腐殖质层,提升了土壤有机碳含量,从而成为重要的碳汇来源。其中,由于生态林草的土壤受人为干扰因素较少,其碳汇量可以采用土壤层有机碳密度与面积之积(公式8)来测算,不同类型生态林草土壤层的碳密度如表4所示。种植农作物与园林的土壤由于受到翻地、施肥等管理措施的影响,不利于土壤有机碳的积累,本研究在参考金琳等对土壤碳汇的研究<sup>[34]</sup>基础上,得出每年化肥与有机肥配施对土壤固碳的增加量为每公顷 0.889 吨碳,每年单施有机肥、单施化肥对土壤固碳的增加量分别为每公顷 0.545 吨碳、0.129 吨碳,免耕、秸秆还田每年对土壤固碳的增加量为每公顷 0.514 吨碳、0.597 吨碳。

(3)碳效率、碳强度与碳密度。碳效率指投入单位碳所产生的经济产量和经济价值等有效价值量<sup>[35]</sup>,通过测算碳效率可以有效地分析碳效应为农业发展带来的效益,农业碳效率主要以生产效率、经济效率、生态效率衡量<sup>[15]</sup>。农业碳强度的测算不再以碳排放量作为计算指标<sup>[16]</sup>,本文引入净碳汇量,农业碳强度即单位农业产值所产生的净碳汇量,正值代表碳汇强度,负值代表碳排放强度。农业碳密度指单位播种面积上所产生的碳排放(汇)量,包括碳排放密度、碳汇密度及净碳汇密度。计算式表示如下:

$$C_{c-e} = Y_i / E_i \quad (9)$$

$$C_{econ-e} = Y_i \times P_i / E_i \quad (10)$$

$$C_{eco-e} = C_i / E_i \quad (11)$$

$$C_I = (C_i - E_i) / (Y_i \times P_i) \quad (12)$$

$$C_{\rho-E} = E_i / A_i \quad (13)$$

$$C_{\rho-C} = C_i / A_i \quad (14)$$

$$C_{\rho-N} = (C_i - E_i) / A_i \quad (15)$$

式(9)~(15)中, $C_{e-e}$ 为碳生产效率, $Y_i$ 为生产项目的产量, $i$ 为项目类型, $E_i$ 为生产项目的碳排放量; $C_{econ-e}$ 为碳经济效率, $P_i$ 为生产项目的价格; $C_{eco-e}$ 为碳生态效率, $C_i$ 为生产项目的碳吸收量; $C_i$ 为碳强度; $C_{\rho-E}$ 为碳排放密度, $C_{\rho-C}$ 为碳汇密度, $C_{\rho-N}$ 为净碳汇密度, $A_i$ 为生产项目的种植面积或饲养数目。由于生态林草的产量难以估量,本研究引入相应的生物量进行估算,且对于部分不产生经济效益的生态林草、畜禽饲养项目的碳生产效率、经济效率及碳强度不予考虑,不同类型林草的生物量密度如表4所示。

## 二、研究区域与数据来源

### 1. 研究区域概况

安塞属陕北黄土高原丘陵沟壑区,土地面积 2 940.9 平方千米(其中 90% 为坡地)<sup>[36]</sup>。气候属中温带大陆性半干旱季风气候,四季长短不等,干湿分明,年平均气温 8.8 °C,年平均降水量 505.3 毫米,74% 降水量集中在 6—9 月,由于其境内水土流失严重及滥伐、滥牧等不合理土地利用,使之成为国家退耕还林重点实施区域。安塞县于 1999 年开始实施大规模的退耕还林工程,林草植被覆盖率明显提高,生态状况得到明显改善。同时,退耕还林工程严重影响了耕地分配水平,从而导致种植面积和结构发生变化,促进了农业产业结构不断调整,使得农户生产经营项目涵盖各类粮食作物、经济作物、生态林草、设施农业等方方面面,因此,选取安塞县作为研究区域来分析农户农业生产项目的综合碳效应更具有全面性和具体性。

### 2. 数据来源及处理

本研究所采用的数据来自于课题组 2016 年 7—8 月农户实地问卷调查,问卷调研采用表格和选择题形式对 2015 年农户家庭基本情况、家庭生产经营情况、家庭收支状况、林牧业生产及退耕还林情况等进行了全面了解,最终共获取 280 份有效问卷。其中,粮食作物秸秆产量依据谷草比法<sup>[37]</sup>测算得出;蔬菜瓜果等经济作物秸秆产量依据产废系数<sup>[38]</sup>测算得出;畜牧家禽价格源于陕西省物价局实时价格监测,体重依据相关学者研究成果计算得出<sup>[39]</sup>;不同树龄苹果树的干径、栽植密度及果实的干物质量依据 Wu 等<sup>[28]</sup>研究成果计算得出;同时为了减小误差,本文以化肥折纯量<sup>[18]</sup>而不是化肥投入量作为排放源指标。在测算过程中,为了方便汇总与比较分析,将计算结果统一折算成标准 C,依据 IPCC 报告可知,1 千克 CH<sub>4</sub> 的温室效应相当于 25 千克 CO<sub>2</sub>,1 千克 N<sub>2</sub>O 的温室效应相当于 298 千克 CO<sub>2</sub>,1 千克 CO<sub>2</sub> 的碳当量为 0.273 千克 C。

## 三、农业生产项目的综合碳效应分析

### 1. 碳排放效应

依据前文构建的农业生产项目碳效应分析框架及相关测算方法,并结合实地调研获取的农户数据,估算了 2015 年农户农业生产项目在各生产环节的碳排放量情况,全年农业生产项目的碳排放量总计为 874 吨。从表 5 中可以看出,各个生产项目之间碳排放效应差异比较明显,其中畜禽养殖项目上碳排放量最少为 80.07 吨,占总排放量的 9.16%,生态林草种植项目上碳排放量最多为 238.53 吨,占总排放量的 27.29%,碳排放效应由大到小依次为生态林草>草本经济作物>粮食作物>木本经济作物>畜禽养殖,主要表现在农资投入、农业能源投入、农田地利用、农业废弃物处理、畜禽养殖五个生产环节。

从农户经营项目具体生产环节的碳排放效应来看,农资投入环节碳排放量最多,排放 365.86 吨,占总排放量的 41.86%,其中氮肥、农膜的投入是促使该环节碳排放效应扩大的主要诱因,分别占到排放总量的 17.94%、11.43%,该环节也是粮食作物、草本及木本经济作物生产项目碳排放的主要来源;农业废弃物处理环节上的碳排放量也占到较大比例,占总排放量的 33.82%,秸秆和薪柴燃烧成为该

环节重要碳排放来源,其中薪柴燃烧导致的碳排放量为 238.344 吨,是引致生态林草生产项目碳排放效应的重要因素;农业能源投入、农田地利用、畜禽饲养环节碳排放量较低,其中农田地利用环节碳排放量最少为 46.245 吨,仅占到总排放量的 5.29%,土壤氧化亚氮排放是农田地利用环节的主要排放来源,电能和汽(柴)油投入、肠道发酵和粪便管理产生的碳排放分别是引致农业能源投入、畜禽饲养环节碳排放效应的主要因素。各环节碳排放效应由大到小依次为农资投入>农业废弃物处理>农业能源投入>畜禽饲养>农田地利用。

表 5 农户经营项目各生产环节的碳排放量

tC

| 类别       | 碳源                     |                    |                    |                    |                  | 总计(占比/%)            |                 |
|----------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------------|-----------------|
|          | 粮食作物                   | 草本经济作物             | 木本经济作物             | 生态林草               | 畜禽养殖             |                     |                 |
| 农资投入     | 氮肥                     | 66.747             | 26.560             | 63.483             | 0.000            | —                   | 156.790 (17.94) |
|          | 磷肥                     | 3.217              | 4.488              | 7.126              | 0.000            | —                   | 14.831 (1.70)   |
|          | 钾肥                     | 0.097              | 1.161              | 1.102              | 0.000            | —                   | 2.360 (0.27)    |
|          | 粪肥                     | 21.105             | 6.003              | 20.659             | 0.000            | —                   | 47.767 (5.47)   |
|          | 农药                     | 0.887              | 30.826             | 12.497             | 0.000            | —                   | 44.210 (5.06)   |
|          | 农膜                     | 2.865              | 95.818             | 1.223              | 0.000            | —                   | 99.906 (11.43)  |
|          | 合计                     | 94.917             | 164.856            | 106.090            | 0.000            | —                   | 365.863 (41.86) |
| 农业能源投入   | 灌溉能源消耗                 | 0.801              | 3.329              | 2.283              | 0.000            | —                   | 6.413 (0.73)    |
|          | 柴油/汽油                  | 10.054             | 2.754              | 15.477             | 0.000            | 0.000               | 28.285 (3.24)   |
|          | 电                      | 0.000              | 34.445             | 0.000              | 0.000            | 0.619               | 35.064 (4.01)   |
|          | 人工                     | 4.966              | 4.402              | 7.513              | 0.182            | 3.360               | 20.423 (2.34)   |
|          | 合计                     | 15.821             | 44.930             | 25.273             | 0.182            | 3.979               | 90.185 (10.32)  |
| 农田地利用    | 翻耕                     | 0.230              | 0.039              | 0.259              | 0.000            | —                   | 0.528 (0.06)    |
|          | 土壤 N <sub>2</sub> O 排放 | 11.160             | 4.275              | 30.282             | 0.000            | —                   | 45.717 (5.23)   |
|          | 合计                     | 11.390             | 4.314              | 30.541             | 0.000            | —                   | 46.245 (5.29)   |
| 农业废弃物处理  | 秸秆燃烧                   | 50.273             | 7.002              | 0.000              | 0.000            | —                   | 57.275 (6.55)   |
|          | 薪柴燃烧                   | 0.000              | 0.000              | 0.000              | 238.344          | —                   | 238.344 (27.27) |
|          | 合计                     | 50.273             | 7.002              | 0.000              | 238.344          | —                   | 295.619 (33.82) |
| 畜禽饲养     | 肠道发酵                   | —                  | —                  | —                  | —                | 64.584              | 64.584 (7.39)   |
|          | 粪便管理                   | —                  | —                  | —                  | —                | 11.498              | 11.498 (1.32)   |
|          | 合计                     | —                  | —                  | —                  | —                | 76.082              | 76.082 (8.70)   |
| 总计(占比/%) | 172.401<br>(19.73)     | 221.102<br>(25.30) | 161.904<br>(18.52) | 238.527<br>(27.29) | 80.071<br>(9.16) | 874.004<br>(100.00) |                 |

注:表中“—”代表不存在,注意区分与 0 的区别;总计中已剔除合计,防止重复计算。

## 2. 碳汇、净碳汇效应

安塞县农户种植的退耕林中,由于退耕政策等原因部分农户虽然种植了经济林木,比如杏树,但并没有通过一系列管护行为获取一定的经济效益,因此在测算过程中,将其归为生态林草固碳,否则归为经济林草固碳,但测算方法保持一致,仍然按照经济林木测算。还有部分农户虽然种植了生态林草,比如油松和苜蓿,却采取一系列投入最终作为绿化苗木出售或畜禽饲料作物,从而获取一定的经济效益,因此在测算过程中,将其归为经济林草或畜禽养殖固碳,否则归为生态林草固碳,测算方法仍然按照生态林草测算。各项目具体碳汇量、净碳汇量如表 6 所示。

表 6 各类农业生产项目的碳汇、净碳汇量

tC

| 类别       | 碳汇                   |                   |                       |                               | 碳排放                 | 净碳汇                    |
|----------|----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------|
|          | 植被层                  | 枯落物层              | 土壤层                   | 合计(占比/%)                      |                     |                        |
| 粮食作物     | 290.244              | 0.000             | 39.528                | 329.772 (1.27)                | 172.401             | 157.371                |
| 草本经济作物   | 74.231               | 0.000             | 10.373                | 84.604 (0.33)                 | 221.102             | -136.499               |
| 木本经济作物   | 1 389.761            | 0.000             | 56.672                | 1 446.433 (5.59)              | 161.904             | 1 284.526              |
| 生态林草     | 3 505.431            | 121.312           | 20 272.648            | 23 899.391(92.38)             | 238.527             | 23 660.864             |
| 畜禽养殖     | 7.710                | 0.000             | 103.460               | 111.170 (0.43)                | 80.071              | 31.099                 |
| 合计(占例/%) | 5 267.377<br>(20.36) | 121.312<br>(0.47) | 20 482.681<br>(79.17) | 25 871.37(100.00)<br>(100.00) | 874.004<br>(100.00) | 24 997.362<br>(100.00) |

注:植被层包含各类植物的木本层、草本层。

表 6 所示,农户农业生产项目的碳汇量总计为 25 871.37 吨,各个项目之间碳汇效应差异比较明显,其中生态林草种植项目的碳汇量高达 23 899.39 吨,占总碳汇量的 92.38%,成为重要碳汇生产项目,各项目碳汇效应由大到小依次为生态林草>木本经济作物>粮食作物>畜禽养殖>草本经济作物。项目碳汇主要来源于植被层、枯落物层和土壤层固碳,其中,土壤层固碳量贡献比例最大,高达 20 482.681 吨,占总碳汇量的 79.17%,成为生态林草和畜禽养殖项目碳汇的主要来源;植被层固碳量占总碳汇量的 20.36%,它是引致粮食作物、草本及木本经济作物生产项目碳汇效应的重要因素。

从各个农业生产项目的净碳汇效应来看,除草本经济作物外,其他项目均表现出正的净碳汇效应,其中依然是生态林草项目表现出极强的净碳汇效应,尽管该项目碳排放量也是最大,但良好的碳汇效应完全抵消了其碳排放量,并获得富余的净碳汇量,同时为抵消其他项目碳排放量做出贡献。最终,农业生产项目的净碳汇量达到 24 997.362 吨,整体表现出正的净碳汇效应。

### 3. 碳效率、碳强度与碳密度

表 7 中计算得出了农户各类生产项目的碳效率、碳强度及碳密度,从碳效率角度来看,设施蔬菜、瓜果等草本经济作物每吨碳排放所产生的经济产量最大为 4.647 吨,碳生产效率最优,但随之产生的经济效益并不是最好的;畜牧养殖项目单位碳排放所产生的经济产量最小,经济效益却是最好的,碳经济效率最优;生态林草生产项目表现出极高的碳生态效率,是重要的生态友好型生产项目。从碳强度角度来看,除草本经济作物项目表现为碳排放强度,其余项目均表现为碳汇强度,这是由于正的净碳汇效应所致。对于生产项目的碳密度,草本经济作物项目碳排放密度最大,尽管生态林草项目碳排放量最多,但其单位种植面积上所产生的碳排放量最小,为每公顷 0.665 吨碳,仅占到草本经济作物项目排放密度的 3.76%,此外其碳汇密度、净碳汇密度也为项目中最大,这说明扩大生态林草项目种植面积,将有利于促进碳汇、净碳汇量的积累。

表 7 农户农业生产项目的碳效率、碳强度及碳密度

| 类别     | 碳效率                 |                          |                       | 碳强度                |                                   | 碳密度                               |                                   |
|--------|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|        | $C_{c-e}/$<br>(t/t) | $C_{econ-e}/$<br>(CNY/t) | $C_{eco-e}/$<br>(t/t) | $C_I/$<br>(kg/CNY) | $C_{PE}/$<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | $C_{PC}/$<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | $C_{PN}/$<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
| 粮食作物   | 1.736               | 4 305.186                | 1.913                 | 0.212              | 2.344                             | 4.484                             | 2.140                             |
| 草本经济作物 | 4.647               | 20 718.725               | 0.383                 | -0.030             | 17.698                            | 6.772                             | -10.926                           |
| 木本经济作物 | 3.046               | 13 438.720               | 8.934                 | 0.590              | 1.955                             | 17.469                            | 15.514                            |
| 生态林草   | —                   | —                        | 100.196               | —                  | 0.665                             | 66.627                            | 65.962                            |
| 畜禽养殖   | 1.636               | 66 670.530               | 1.388                 | 0.005              | —                                 | —                                 | —                                 |

注:表中“—”代表不存在,主要是由于项目值为 0 或项目计量单位不一致而导致无法计算。

## 四、农业生产项目综合碳效应的结构分布特征

通过深入剖析农业生产项目碳排放、碳汇以及净碳汇量的具体比例分布,有助于我们了解农户农业生产项目层面碳效应的驱动因素,并针对性地开展农业温室气体减排工作,从而提高减排效率。因此,本文对农户 28 个具体农业生产项目的碳排放量、碳汇量及净碳汇量进行了细致测算,见表 8。

### 1. 碳排放量具体项目分布

从表 8 测算的结果来看,在粮食作物的生产项目上,玉米种植碳排放量最大,排放 122.56 吨,占本类项目排放量的 71.09%,洋芋、谷子及豆子种植产生的碳排放量紧随其后,糜子排放量最少,所以玉米成为该类项目的主要碳排放来源,结合表 5 可知,在该类项目上应具有针对性的对玉米种植项目在氮肥、粪肥的施用及作物秸秆燃烧开展相关农业温室气体减排工作;在草本经济作物生产项目上,调研区域农户基本以拱棚设施作业为主,其中种植茄子碳排放量最大为 58.10 吨,占本类项目排放量的 26.28%,而种植草莓和葡萄碳排放量较少,结合表 5 可知,氮肥、农膜、农药以及电能的投入使用是该类项目重要的碳排放来源,应针对这些环节结合茄子、西红柿、黄瓜等具体设施农作项目开展温室气体减排;在木本经济作物生产项目上,种植苹果是该类项目主要碳排放来源,排放量达 141.15 吨,占本类项目的 87.18%,所以在该类项目上,针对苹果种植项目在氮肥、粪肥施用以及土地管理环节开

展减排工作,将有助于提高减排效率;在生态林草生产项目上,种植刺槐碳排放量最高为 226.99 吨,占本类项目的 95.16%,沙棘紧随其后,排放量占本类项目的 4.82%,剩余其他品种生态林草碳排放量十分微小。依据表 5 及调研实际可知,薪柴燃烧是导致刺槐和沙棘项目碳排放量的主要来源,通过控制薪柴获取途径、使用量将有效地实现温室气体减排;在畜禽养殖项目上,养羊是该类项目主要碳排放来源,排放 73.46 吨,占本类项目排放量的 91.74%,其他养殖项目排放量较少,因此,通过调整饲料投放、粪便管理等途径,是实现养殖项目温室气体减排的关键因素。

表 8 农户具体农业生产项目的碳排放量、碳汇量及净碳汇量

| 类别     | 碳排放效应      |            |            | 碳汇效应       |            |            | 净碳<br>汇量/tC |            |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
|        | 排放<br>量/tC | 本类<br>占比/% | 总量<br>占比/% | 碳汇<br>量/tC | 本类<br>占比/% | 总量<br>占比/% |             |            |
| 粮食作物   | 玉米         | 122.555    | 71.087     | 14.022     | 210.530    | 63.841     | 0.814       | 87.975     |
|        | 洋芋         | 18.911     | 10.969     | 2.164      | 10.145     | 3.076      | 0.039       | -8.766     |
|        | 谷子         | 20.131     | 11.677     | 2.303      | 93.929     | 28.483     | 0.363       | 73.798     |
|        | 糜子         | 2.496      | 1.448      | 0.286      | 2.465      | 0.747      | 0.010       | -0.031     |
|        | 豆子         | 8.308      | 4.819      | 0.951      | 12.703     | 3.852      | 0.049       | 4.395      |
|        | 合计         | 172.401    | 100.000    | 19.725     | 329.772    | 100.000    | 1.275       | 157.371    |
| 草本经济作物 | 茄子         | 58.096     | 26.276     | 6.647      | 31.067     | 36.720     | 0.120       | -27.029    |
|        | 西瓜         | 23.440     | 10.601     | 2.682      | 8.714      | 10.300     | 0.034       | -14.726    |
|        | 香瓜         | 27.184     | 12.295     | 3.110      | 2.573      | 3.041      | 0.010       | -24.611    |
|        | 草莓         | 14.263     | 6.451      | 1.632      | 1.457      | 1.722      | 0.006       | -12.806    |
|        | 辣椒         | 28.154     | 12.733     | 3.221      | 11.664     | 13.787     | 0.045       | -16.490    |
|        | 黄瓜         | 29.518     | 13.350     | 3.377      | 12.454     | 14.720     | 0.048       | -17.064    |
|        | 西红柿        | 33.477     | 15.141     | 3.830      | 16.116     | 19.049     | 0.062       | -17.361    |
|        | 葡萄         | 6.971      | 3.153      | 0.798      | 0.559      | 0.661      | 0.002       | -6.412     |
| 合计     | 221.102    | 100.000    | 25.298     | 84.604     | 100.000    | 0.327      | -136.498    |            |
| 木本经济作物 | 苹果         | 141.145    | 87.178     | 16.149     | 1 036.293  | 71.645     | 4.006       | 895.148    |
|        | 核桃         | 1.076      | 0.665      | 0.123      | 12.027     | 0.831      | 0.046       | 10.951     |
|        | 杏          | 17.998     | 11.116     | 2.059      | 384.536    | 26.585     | 1.486       | 366.538    |
|        | 油松         | 1.684      | 1.040      | 0.193      | 13.576     | 0.939      | 0.052       | 11.892     |
|        | 合计         | 161.904    | 100.000    | 18.524     | 1 446.433  | 100.000    | 5.591       | 1 284.529  |
| 生态林草   | 刺槐         | 226.990    | 95.163     | 25.971     | 13 248.888 | 55.436     | 51.211      | 13 021.898 |
|        | 沙棘         | 11.497     | 4.820      | 1.315      | 5 889.767  | 24.644     | 22.766      | 5 878.270  |
|        | 杏          | 0.011      | 0.005      | 0.001      | 253.307    | 1.060      | 0.979       | 253.296    |
|        | 山桃         | 0.018      | 0.008      | 0.002      | 2 089.689  | 8.744      | 8.077       | 2 089.671  |
|        | 油松         | 0.001      | 0.000      | 0.000      | 169.176    | 0.708      | 0.654       | 169.175    |
|        | 柠条         | 0.010      | 0.004      | 0.001      | 1 179.647  | 4.936      | 4.560       | 1 179.637  |
|        | 苜蓿         | 0.001      | 0.000      | 0.000      | 155.640    | 0.651      | 0.602       | 155.639    |
|        | 沙打旺        | 0.001      | 0.000      | 0.000      | 94.496     | 0.395      | 0.365       | 94.495     |
|        | 荒草         | 0.000      | 0.000      | 0.000      | 818.780    | 3.426      | 3.165       | 818.780    |
|        | 合计         | 238.527    | 100.000    | 27.291     | 23 899.391 | 100.000    | 92.378      | 23 660.864 |
|        | 畜禽养殖       | 苜蓿         | 0.010      | 0.012      | 0.001      | 111.170    | 100.000     | 0.430      |
| 羊      |            | 73.456     | 91.739     | 8.405      | 0.000      | 0.000      | 0.000       | -73.456    |
| 鸡      |            | 1.682      | 2.101      | 0.192      | 0.000      | 0.000      | 0.000       | -1.682     |
| 猪      |            | 4.317      | 5.391      | 0.494      | 0.000      | 0.000      | 0.000       | -4.317     |
| 驴      |            | 0.606      | 0.757      | 0.069      | 0.000      | 0.000      | 0.000       | -0.606     |
| 合计     |            | 80.071     | 100.000    | 9.161      | 111.170    | 100.000    | 0.430       | 31.099     |
| 总计     | 874.004    | —          | 100.000    | 25 871.370 | —          | 100.000    | 24 997.362  |            |

从整体农业生产项目碳排放角度来讲,农户 28 个具体农业生产项目的碳排放量由大到小依次为刺槐、苹果、玉米、羊、茄子、西红柿、黄瓜、辣椒、香瓜、西瓜、谷子、洋芋、杏、草莓、沙棘、豆子、葡萄、猪、糜子、油松、鸡、核桃、驴、山桃、柠条、苜蓿、沙打旺、荒草,其中种植刺槐排放量占到最大,占总体项目的 25.97%,种植苹果和玉米碳排放量位列二三,分别占到总体项目的 16.15%、14.04%,排在前五位的种植刺槐、苹果、玉米、茄子及养羊也是其所在本类项目中的主要碳排放源。因此,碳排放量具体项

目分布结构及主要排放来源差异很大,同类间不同项目及不同类间不同项目的碳排放效应驱动因素也各不相同,故温室气体减排工作开展的侧重点也应有所不同。

## 2. 碳汇量具体项目分布

从整体农业生产项目碳汇量具体分布来看,农户 28 个具体农业生产项目的碳汇量由大到小依次为刺槐、沙棘、山桃、柠条、苹果、荒草、杏、玉米、油松、苜蓿、沙打旺、谷子、茄子、西红柿、豆子、黄瓜、核桃、辣椒、洋芋、西瓜、香瓜、糜子、草莓、葡萄、家禽牲畜类。从排在前 10 位的生产项目来看,总计 8 项都来源于生态林草类,其中刺槐碳汇产量最高为 13 248.890 吨,占总项目的 51.21%,这 8 项碳汇量总和占到总项目的 92.01%,由此可知生态林草类生产项目是十分重要的碳汇来源。木本经济作物类生产项目碳汇量合计达到 1 446.430 吨,仅次于生态林草类生产项目,其中以苹果、杏(产生经济效益部分)生产项目碳汇量贡献最多,碳汇量达到 1 036.290 吨、384.540 吨,分别排在 28 个生产项目中第 5、7 位。粮食作物类生产项目碳汇量紧随其后,合计达到 329.772 吨,其中以玉米种植项目碳汇量最多为 210.530 吨,占本类项目碳汇量的 63.84%,在 28 个生产项目中排在第 8 位。草本经济作物类和畜牧养殖类生产项目碳汇量较少,以草本经济作物类最低为 84.600 吨,仅占总项目的 0.33%,碳汇量排在后 18 位的生产项目较多来自于草本经济作物类,畜牧养殖类项目仅饲料作物(苜蓿)种植环节发生碳吸收,碳汇量达 111.170 吨。

在粮食作物的生产项目上,虽然种植玉米获得的碳汇量最多,但计算其碳汇密度得到玉米为每公顷 4.88 吨,而谷子远超玉米高达每公顷 9.38 吨,其他类生产项目也出现类似现象,比如设施经济作物项目中的辣椒和黄瓜种植,虽然黄瓜种植的总碳汇量要高于辣椒,但是其碳汇密度每公顷要比辣椒少 1.08 吨,木本经济作物类项目中的核桃和油松,油松碳汇量远高于核桃,但单位碳汇密度要低于核桃,生态林草类项目中的山桃、油松,其单位碳汇密度每公顷要比沙棘分别高出 14.49 吨、7.20 吨。因此,项目碳汇总量多并不代表其碳汇能力强,合理调整产业结构,引导农户生产向碳汇能力较强的农业项目过渡,将是实现农户层面农业碳汇量快速积累的必要措施。

## 3. 净碳汇量具体项目分布

净碳汇量是衡量不同项目碳生产盈亏的关键指标,通过分析计算所得的数值大小和正负可以比较不同项目的净碳汇效应。在粮食作物类生产项目上,玉米和谷子净碳汇效应最优,整个生产过程分别盈余 87.975 吨、73.798 吨碳,洋芋和糜子种植项目则处于亏损状态,表现出负的净碳汇效应,但从该类项目整体来看,总共盈余 157.371 吨碳,净碳汇效应良好;在草本经济作物类生产项目上,整体均表现出负的净碳汇效应,净碳汇量亏损严重,其中茄子和香瓜种植项目亏损量最大,该类项目总计亏损 136.498 吨碳;在木本经济作物类生产项目上,均表现出正的净碳汇效应,获得富余的净碳汇量,其中苹果和杏种植项目贡献最大,分别盈余 895.148 吨和 366.538 吨碳;在生态林草类生产项目上,所有项目均表现出极强的净碳汇效应,仅刺槐项目净碳汇量贡献就达到 13 021.900 吨,占本类项目净碳汇总量的 55.04%,沙棘、山桃、柠条净碳汇量均盈余千吨以上,该类生产项目毫无疑问的为整体农业项目碳排放量的抵消作出巨大贡献;畜牧养殖项目中,饲料作物种植产生的碳汇量很好的抵消了家禽牲畜产生的碳排量,最终该类项目盈余 31.100 吨净碳汇量。最终,整体农业生产项目净碳汇量盈余 24 997.362 吨碳,净碳汇效应十分良好。

# 五、结论与启示

## 1. 结 论

本研究通过构建农业生产项目碳效应分析框架和测算体系,结合实地农户调研获取的数据,量化分析了农户农业生产项目上的综合碳效应,说明该套在农户层面上按农业生产项目进行的碳效应分析框架和测算体系是有效、可行的。通过深入分析农业生产项目的综合碳效应,得出以下结论:

(1)农业生产项目的综合碳效应因项目不同而差异明显。①碳排放效应在各类生产项目上均有体现且差异不大,主要分布在农资投入、农业能源投入、农田地利用、农业废弃物处理、畜禽饲养五个生产环节,其中农资投入和农业废弃物处理环节是项目碳排放产量的主要来源。②碳汇效应在各类

生产项目表现出较大的差异,其中92.38%的碳汇量都集中在生态林草类项目上,项目碳汇主要来源于植被层、枯落物层和土壤层固碳,其中79.17%的碳汇量源于土壤层固碳。③除草本经济作物外,其他项目均表现出正的净碳汇效应,以生态林草类项目贡献最为突出。最终,所调研农户的生产项目碳排放量达874.004吨,户均排放3.121吨碳,碳汇量达25871.370吨,户均吸收92.397吨碳,净碳汇量达到24997.362吨,户均盈余89.276吨碳,净碳汇效应良好。

(2)综合碳效应的具体项目分布特征各异。①在粮食作物类生产项目上,碳排放、碳汇及净碳汇效应均在玉米种植项目上表现明显,其中氮肥、粪肥的施用及作物秸秆燃烧是其碳排放的主要来源,虽然种植玉米碳汇效应明显,但碳汇密度要低于谷子种植项目。②草本经济作物类项目碳生产效率最优,碳排放强度和密度最大,碳排放、碳汇效应均在茄子种植项目上表现明显,氮肥、农膜、农药以及电能的投入使用是该类项目重要的碳排放来源,整体表现出负的净碳汇效应,净碳汇量总计亏损136.498吨。③在木本经济作物生产项目上,综合碳效应明显体现在种植苹果项目上,氮肥、粪肥施用以及土地管理是其主要排放源,各具体项目均表现出正的净碳汇效应。④生态林草类项目碳生态效率最优,所有项目均表现出极强的碳汇、净碳汇效应和密度,综合碳效应明显体现在刺槐种植项目上,薪柴燃烧是该项目碳排放的主要来源。⑤畜禽养殖项目碳经济效率最优,碳排放效应主要体现在家禽牲畜肠道发酵、粪便管理环节上,饲料作物种植产生的碳汇效应很好的抵消了该项目碳排放量,最终表现出正的净碳汇效应。

## 2. 启 示

基于以上结论,本文有如下启示:①建立微观农户农业生产项目碳效应的核算机构与机制,明确各地区农业生产项目、生产环节主要碳排放来源,有针对性地开展农业温室气体减排工作,从而提高温室气体减排效率。②构建以农业生产项目碳汇/净碳汇效应为标准的生态补偿机制,在量化分析农户农业生产项目碳效应的基础之上,强化耕地、草原、林业、湿地等主要生态系统补贴政策,从而激发农户低碳、绿色生产的积极性,改善以往“被动”应对气候变化的局面。③构建微观农户农业生产项目碳效应的测评机制,科学量化农户低碳生产模式,引导农户生产方式、行为向低碳化转变,从而实现农业生产经济效益与生态效益“双赢”局面。

## 参 考 文 献

- [1] 黄祖辉,米松华.农业碳足迹的研究——以浙江省为例[J].农业经济问题,2011(11):40-47.
- [2] 宋博,穆月英,侯玲玲.农户专业化对农业低碳化的影响研究——来自北京市蔬菜种植户的证据[J].自然资源学报,2016,31(3):468-476.
- [3] 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.
- [4] 田云,张俊彪.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.
- [5] 陈罗焯,薛颖,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.
- [6] LUYSSAERT S, SCHULZE E D, BORNER A, et al. Old-growth forests as global carbon sinks [J]. Nature, 2008, 455(7210): 213-215.
- [7] 田云,张俊彪,吴贤荣,等.中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析——基于31个省(市、区)2000—2012年的面板数据[J].自然资源学报,2015,30(11):1886-1309.
- [8] 孟祥海,程国强,张俊彪.中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J].中国环境科学,2014,34(8):2167-2176.
- [9] GARNETT T. Livestock-related greenhouse gas emissions: impacts and options for policy makers [J]. Environmental science & policy, 2009, 12(4): 491-503.
- [10] 王效琴,梁东丽,王旭东,等.运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J].农业工程学报,2012,28(13):179-184.
- [11] YAN X, HIROKO A, KAZUYUKI Y, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines [J]. Global biogeochemical cycles, 2009, 23(2): 125-151.
- [12] 张灿强,王莉,华春林,等.中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J].资源科学,2016,38(4):790-797.
- [13] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. IPCC, 2007: Summary for policymakers [M]// Climate Change 2007: The Physical

Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

- [14] FAO. Carbon sequestration options under the clean development mechanism to address land gradation [R]. World soil resources Reports 92. FAO and IFAD, Rome, 2000.
- [15] 陈中督, 吴尧, 董晋松, 等. 湖南省双季稻生产系统碳效率[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 87-92.
- [16] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. 农业经济问题, 2014, 35(7): 18-26, 110.
- [17] 田云, 张俊彪. 中国农业碳排放研究回顾、评述与展望[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2014(2): 23-27.
- [18] 邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 534-544.
- [19] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383.
- [20] 周贝贝, 王一明, 林先贵. 不同处理方式的粪肥对水稻生长和温室气体排放的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016(3): 430-436.
- [21] 陈琳, 闫明, 潘根兴. 南京地区大棚蔬菜生产的碳足迹调查分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1791-1796.
- [22] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [23] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤  $N_2O$  的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010(6): 1524-1530.
- [24] 赵建宇, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812-816.
- [25] ANDREAE M O, MERLET P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. Global biogeochemical cycles, 2001, 15(4): 955-966.
- [26] 国家发展改革委应对气候变化司. 2005 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [27] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [28] WU T, WANG Y, YU C, et al. Carbon sequestration by fruit trees—Chinese apple orchards as an example[J]. Plos one, 2012, 7(6): 1-12.
- [29] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [30] 郭兆迪, 胡会峰, 李品, 等. 1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2013(5): 421-431.
- [31] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
- [32] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [33] 刘涛, 党小虎, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区 3 种退耕灌木林生态系统碳密度的对比研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013(9): 68-72.
- [34] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 734-743.
- [35] 尹钰莹, 郝晋珉, 牛灵安, 等. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 918-928.
- [36] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响——以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报, 2011(11): 1866-1878.
- [37] 韩鲁捷, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.
- [38] 韩雪, 常瑞雪, 杜鹏祥, 等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015(4): 377-382.
- [39] 高晔, 闫海龙, 冯平, 等. 陕北白绒山羊体尺与体重相关回归分析[J]. 中国草食动物科学, 2010, 30(5): 30-32.

(责任编辑: 金会平)