

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.07.008

吴兆娟, 周霖, 杨小玲, 等. “双碳”目标下低碳农业技术发展应用条件评价及路径研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(7): 71-83.

## “双碳”目标下低碳农业技术发展 应用条件评价及路径研究

吴兆娟<sup>1,2</sup>, 周霖<sup>1,2</sup>, 杨小玲<sup>1,2</sup>, 高冬梅<sup>1,2</sup>, 战博<sup>3</sup>

1. 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 2. 农业农村部西南山地智慧农业重点实验室, 重庆 401329;  
3. 重庆市南岸区乡村振兴发展指导中心, 重庆 401336

**摘要:** “双碳”目标下, 科学评估筛选适宜不同地域的农业减排固碳技术, 并因地制宜制定低碳农业技术路径具有重要的现实意义. 综合采取德尔菲法、层次分析法、多因素综合评价模型进行评价表明, 种植、养殖、能源消耗 3 个方面 42 项技术中发展应用条件综合水平位于  $3 \geq Z \geq 2.5$ 、 $2.5 > Z \geq 2$ 、 $2 > Z \geq 1$  等 3 个区间的比重分别为 16.67%, 61.90%, 21.43%, 大部分技术在重庆具有较好的综合推广应用条件, 其中种植方面最好; 重庆低碳农业发展可采取分区分级思路, 根据农业生产特点按粮食主产区、养殖集中区、生态脆弱区分区推进“双增双减”“稳能减排”“提能固碳”综合技术路径, 根据技术发展应用条件水平分级优先推广位于  $3 \geq Z \geq 2.5$  区间的 7 项技术, 以及位于  $2.5 > Z \geq 2$  区间的 26 项技术. 最后提出加快低碳农业技术的创新步伐、推广应用、发展环境建设等对策建议.

**关键词:** “双碳”目标; 低碳农业技术; 减排固碳; 环境保护;

德尔菲法

中图分类号: F323.22; X322

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)07-0071-13

## Evaluation and Path Research on the Development and Application Conditions of Low Carbon Agricultural Technology under the “Dual Carbon” Goal

WU Zhaojuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Lin<sup>1,2</sup>, YANG Xiaolin<sup>1,2</sup>,  
GAO Dongmei<sup>1,2</sup>, ZHAN Bo<sup>3</sup>

1. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China;

2. Southwest Mountain Smart Agriculture Key Laboratory, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,  
Chongqing 401329, China;

3. The Development Guidance Center of Rural Revitalization in Chongqing Nan'an District, Chongqing 401336, China

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 重庆市技术预见与制度创新项目(cstc2021jsyj-yzysbAX0027).

作者简介: 吴兆娟, 博士, 助理研究员, 主要从事乡村振兴研究.

通信作者: 杨小玲, 高级工程师.

**Abstract:** To achieve the “dual carbon” goal, it is of great practical significance to scientifically evaluate and screen agricultural emission reduction and carbon sequestration technologies suitable for different regions, and develop low-carbon agricultural technology paths tailored to local conditions. Delphi method, analytic hierarchy process and multi factor comprehensive evaluation model were comprehensively adopted for evaluation. The results show that among 42 technologies in three aspects of planting, feeding and energy consumption, the proportion of the comprehensive development and application conditions in the three intervals of  $3 \geq Z \geq 2.5$ ,  $2.5 > Z \geq 2$ , and  $2 > Z \geq 1$  is 16.67%, 61.90%, and 21.43%, respectively. Most technologies are with the good comprehensive promotion and application conditions in Chongqing, among which for planting is the best. The development of low-carbon agriculture in Chongqing can adopt a zoning and grading approach. Based on the characteristics of agricultural production, the comprehensive technological path of “double increase and double decrease”, “stable energy and emission reduction”, and “energy improvement and carbon fixation” can be promoted accordingly to the main grain producing areas, feeding concentrated areas, and ecologically fragile areas. According to the level of technological development and application conditions, priority should be given to promoting 7 technologies located in the  $3 \geq Z \geq 2.5$  interval, as well as 26 technologies located in the  $2.5 > Z \geq 2$  interval. Finally, suggestions are proposed to accelerate the innovation pace, promote application and develop environmental construction of low-carbon agricultural technology.

**Key words:** “dual carbon” goal; low-carbon agricultural technology; emission reduction and carbon sequestration; environmental protection; Delphi method

国家主席习近平在 2020 年 9 月第七十五届联合国大会一般性辩论会上提出, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和. 实现碳达峰、碳中和(以下简称“双碳”)目标是应对气候变化, 着力解决资源环境约束突出问题, 实现中华民族永续发展的必然选择, 是构建人类命运共同体的庄严承诺<sup>[1]</sup>. 在实现碳达峰、碳中和的征程中, 农业的作用举足轻重. 根据联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 简称 FAO)农业排放数据统计, 全球农业每年排放温室气体约占人为温室气体排放总量的三成左右, 气体重量合计 150 亿 t; 而农业产业本身具有的生态碳汇功能, 可抵消约 110 亿 t 的温室气体, 剩余 40 亿 t 仍待处理<sup>[2]</sup>. 可见, 实现“双碳”目标, 农业减排固碳既是重要手段, 又大有潜力.

目前我国已在农业减排固碳领域开展了大量研究, 相关研究认为我国农业排放温室气体主要由甲烷、氧化亚氮、二氧化碳构成, 农业温室气体来源从种植、养殖各占“半壁江山”到种植、养殖、能源消耗“三分天下”<sup>[3]</sup>. 同时对农业温室气体排放和减排固碳技术进行了大量的试验, 研发和筛选出稻田甲烷减排、农用地氧化亚氮减排、保护性耕作固碳、农作物秸秆还田固碳、反刍动物肠道甲烷减排、畜禽粪便管理温室气体减排、农业机械节能减排等系列技术<sup>[4-8]</sup>. 但现实中这些技术的实施受经济水平、农业生产方式和结构、生产技术以及政策等多种因素影响, 农田生态系统碳增汇/减排措施的选取, 应根据不同的地域进行分析<sup>[9]</sup>. 尤其在当前“双碳”目标下, 急需加强对农业减排固碳技术在不同地域的适应性研究, 从而因地制宜制定出各地的低碳农业技术路径.

为此, 本文基于目前农业减排固碳技术研究, 立足重庆区域, 研究选取出减排固碳效应、技术成熟度、环境适应性、社会适应性、当前应用规模 5 个反映农业减排固碳技术特点的指标<sup>[10]</sup>, 并采取德尔菲法、层次分析法、多因素综合评价模型对农业减排固碳技术的发展应用条件水平进行综合评价, 再基于各技术发展应用条件水平高低进行碳增汇、碳减排以及综合技术路径的构建. 这既是对现有低碳农业技术研究视角的丰富, 又可为重庆乃至全国推进“双碳”提供技术路径切入点和政策举措突破口, 促进形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式和生活方式.

# 1 研究方法

## 1.1 低碳农业技术体系梳理

参考已有学者对农业减排固碳技术的研究成果<sup>[9, 11-17]</sup>,结合 2021 年中国农业农村科技发展高峰论坛暨中国现代农业发展论坛发布会发布的农业农村减排固碳 10 大技术模式,立足重庆现实情况,分别从种植、养殖、能源消耗 3 个方面<sup>[3]</sup>,研究梳理稻田甲烷减排、农用地氧化亚氮减排、保护性耕作固碳、农作物秸秆还田固碳、反刍动物肠道甲烷减排、畜禽粪便管理温室气体减排、农业机械节能减排等 7 类低碳农业技术(表 1).

表 1 低碳农业技术体系

| 序号 | 技术名称           | 具体技术措施                                                                  |
|----|----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 一  | 种植             |                                                                         |
| 1  | 稻田甲烷减排技术       | 种植低排品种、稻渔复合种养、再生稻、半旱式、直播稻、少免耕、节水灌溉、氮肥减施、有机肥堆肥发酵后还田、控释肥或配施生物抑制剂、适量的生物炭还田 |
| 2  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 测土配方施肥,氮肥的混施、深施或条施等,缓控释肥,水肥一体化灌溉                                        |
| 3  | 保护性耕作固碳技术      | 少耕、休耕、免耕播种、轮作                                                           |
| 4  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 秸秆覆盖还田、秸秆粉碎翻压还田、秸秆炭化还田、秸秆基质化利用后还田、秸秆堆沤还田、秸秆过腹还田                         |
| 二  | 养殖             |                                                                         |
| 5  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 选育低排放品种、优化饲料品种、合理搭配精粗饲料比例、饲料加工(秸秆青贮、化学处理、物理加工等)、瘤胃微生物调控、多功能舔砖饲喂         |
| 6  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 人工干清粪、自动(机械)干清粪、异位发酵床、高床养殖、固体粪便堆肥、液体沼气发酵、粪水还田                           |
| 三  | 能源消耗           |                                                                         |
| 7  | 农业机械节能减排技术     | 复式智能农机装备、节能型农机装备、清洁能源智能农业机械装备、节种节水节能节肥节药的农机化技术                          |

## 1.2 低碳农业技术评价指标

为反映低碳农业技术的低碳效应、技术研发及推广应用情况,在此选取反映技术低碳效应水平的减排固碳效应指标、反映技术研发水平的技术成熟度指标、反映技术推广应用条件的环境适应性和社会适应性指标、反映技术推广应用水平的当前应用规模指标等 5 个指标作为技术现状水平评价指标<sup>[10]</sup>(表 2).

表 2 低碳农业技术现状水平评价指标体系

| 序号 | 评价指标         | 指标含义                                                          |
|----|--------------|---------------------------------------------------------------|
| 1  | 减排固碳效应 $a_1$ | 其中减排效应是指实施技术措施后的减排效果,碳汇效应是指实施技术措施后的固碳速率                       |
| 2  | 技术成熟度 $a_2$  | 指技术措施在技术上是否成熟,或从技术上是否适合推广                                     |
| 3  | 环境适应性 $a_3$  | 指技术措施是否对环境(温度和降水)具有较高适应性或从环境承受力角度是否适合推广,即受区域内自然环境或生产条件的制约程度情况 |
| 4  | 社会适应性 $a_4$  | 指从社会法规、公众行为和经济角度考虑技术措施是否适合推广,是否受传统行为、社会机制或现行法规的制约             |
| 5  | 当前应用规模 $a_5$ | 指技术措施在重庆市农业生态系统中的应用或推广情况                                      |

1.3 德尔菲法

采取德尔菲法(Delphi method)对各项低碳农业技术的研发应用推广等现状情况进行判断评价。在此将技术评价指标的评价结果分为 3 个星级(即用星号数量表示优劣度(\*、\*\*、\*\*\*)),为能进行定量计算,将 3 个星级分别赋值为 1,2,3,星级越多或数值越高则表明该项技术措施具有更强的碳汇/减排效应或更适合推广以及推广应用更广。

专家赋值:

$$a_{ij}=1/2/3 \qquad i=1,2,\cdots,5 \tag{1}$$

其中, $i$  代表某一个评价指标, $j$  代表某一项低碳农业技术。

通过专家咨询,每项具体技术的减排固碳效应、技术成熟度、环境适应性、社会适应性、当前应用规模等评价指标均得到多位专家的多个判断值。为综合专家判断意见,在此以评价指标判断值 1,2,3 的频率为权重计算综合得分,再对综合得分采取四舍五入方式以及考虑专家权威性等因素进行取整,得到技术评价指标的综合判断值(表 3)。

综合得分计算:

$$A_{ij}=1\times w_1+2\times w_2+3\times w_3 \qquad i=1,2,\cdots,5 \tag{2}$$

其中: $i$  代表某一个评价指标, $j$  代表某一项低碳农业技术; $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别为评价指标专家判断值 1,2,3 的频率。

表 3 低碳农业技术现状评价指标的综合判断值

| 序号 | 低碳农业技术       | 减排固<br>碳效应 | 技术<br>成熟度 | 环境<br>适应性 | 社会<br>适应性 | 当前应<br>用规模 | 序号 | 低碳农业技术           | 减排固<br>碳效应 | 技术<br>成熟度 | 环境<br>适应性 | 社会<br>适应性 | 当前应<br>用规模 |
|----|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|----|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 一  | 稻田甲烷减排技术     |            |           |           |           |            | 3  | 秸秆炭化还田           | 3          | 1         | 1         | 1         | 1          |
| 1  | 种植低排品种       | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 4  | 秸秆基质化利用后还田       | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          |
| 2  | 稻渔复合种养       | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 5  | 秸秆堆沤还田           | 2          | 2         | 2         | 2         | 2          |
| 3  | 再生稻          | 2          | 3         | 2         | 2         | 1          | 6  | 秸秆过腹还田           | 2          | 3         | 2         | 2         | 2          |
| 4  | 半旱式          | 2          | 2         | 1         | 2         | 1          | 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术     |            |           |           |           |            |
| 5  | 直播稻          | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 1  | 选育低排放品种          | 1          | 1         | 1         | 1         | 1          |
| 6  | 少免耕          | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 2  | 优化饲料品种           | 2          | 2         | 2         | 3         | 2          |
| 7  | 节水灌溉         | 3          | 3         | 2         | 2         | 2          | 3  | 合理搭配精粗饲料比例       | 3          | 3         | 2         | 3         | 2          |
| 8  | 氮肥减施         | 2          | 2         | 2         | 2         | 2          | 4  | 饲料加工             | 2          | 2         | 2         | 2         | 2          |
| 9  | 有机肥堆肥发酵后还田   | 2          | 3         | 2         | 2         | 2          | 5  | 瘤胃微生物调控          | 3          | 2         | 2         | 2         | 1          |
| 10 | 控释肥或配施生物抑制剂  | 3          | 2         | 2         | 2         | 1          | 6  | 多功能舔砖饲喂          | 1          | 2         | 2         | 2         | 2          |
| 11 | 适量的生物炭还田     | 2          | 2         | 2         | 1         | 1          | 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术   |            |           |           |           |            |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术  |            |           |           |           |            | 1  | 人工干清粪            | 2          | 3         | 3         | 2         | 3          |
| 1  | 测土配方施肥       | 3          | 3         | 3         | 3         | 2          | 2  | 自动(机械)干清粪        | 2          | 2         | 3         | 2         | 2          |
| 2  | 氮肥的混施、深施或条施等 | 3          | 3         | 2         | 2         | 1          | 3  | 异位发酵床            | 1          | 2         | 1         | 2         | 2          |
| 3  | 缓控释肥         | 3          | 2         | 3         | 2         | 1          | 4  | 高床养殖             | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          |
| 4  | 水肥一体化灌溉      | 3          | 2         | 2         | 2         | 1          | 5  | 固体粪便堆肥           | 2          | 3         | 2         | 2         | 2          |
| 三  | 保护性耕作固碳技术    |            |           |           |           |            | 6  | 液体沼气发酵           | 3          | 3         | 2         | 2         | 3          |
| 1  | 少耕           | 3          | 2         | 2         | 2         | 1          | 7  | 粪水还田             | 2          | 3         | 2         | 2         | 2          |
| 2  | 休耕           | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 七  | 农业机械节能减排技术       |            |           |           |           |            |
| 3  | 免耕播种         | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          | 1  | 复式智能农机装备         | 3          | 1         | 2         | 1         | 1          |
| 4  | 轮作           | 3          | 2         | 2         | 2         | 2          | 2  | 节能型农机装备          | 3          | 1         | 2         | 2         | 1          |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术  |            |           |           |           |            | 3  | 清洁能源智能农业机械装备     | 3          | 1         | 1         | 2         | 1          |
| 1  | 秸秆覆盖还田       | 3          | 3         | 3         | 3         | 2          | 4  | 节种节水节能节肥节药的农机化技术 | 3          | 2         | 2         | 2         | 1          |
| 2  | 秸秆粉碎翻压还田     | 2          | 2         | 2         | 2         | 1          |    |                  |            |           |           |           |            |

1.4 层次分析法

采取层次分析法(The Analytic Hierarchy Process)进行农业减排固碳技术评价指标的权重确定。根据

8 位专家构建的判断矩阵分别进行层次分析法求取权重,且均通过一致性检验,最后将 8 位专家权重的平均值确定为指标权重,即减排固碳效应  $a_1$ 、技术成熟度  $a_2$ 、环境适应性  $a_3$ 、社会适应性  $a_4$  4 个评价指标的权重值分别为 0.21,0.37,0.18,0.24(表 4).

表 4 专家信息统计表

| 咨询内容             | 专家数/<br>位 | 职称                 | 研究领域                                                                             | 平均工作<br>年限/年 | 平均<br>年龄/岁 |
|------------------|-----------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|
| 养殖方面的减排固碳技术      | 6         | 高级职称 4 人,行业管理者 2 人 | 畜禽养殖环境与工程、农业资源化利用技术、动物营养与饲料科学、生态农业研究管理、农业废弃物资源化利用技术及生态循环农业模式研究                   | 19           | 42         |
| 种植、能源消耗方面的减排固碳技术 | 6         | 高级职称 4 人,行业管理者 2 人 | 农田生态与循环农业、农业生态与农作制度、水稻生理生态及机械化轻简栽培技术研究与推广、生态农业研究管理、农业废弃物资源化利用技术及生态循环农业模式研究       | 20           | 45         |
| 农业减排固碳技术评价指标权重   | 8         | 高级职称 6 人,行业管理者 2 人 | 畜禽养殖环境与工程、农业资源化利用技术、动物营养与饲料科学、农田生态与循环农业、农业生态与农作制度、水稻生理生态及机械化轻简栽培技术研究与推广、生态农业研究管理 | 18           | 43         |

1.5 低碳农业技术发展应用条件综合水平评价

低碳农业技术发展应用条件综合水平评价模型如下:

$$Z_j = \sum W_i \times A_{ij} \qquad i = 1, 2, 3, 4$$

(3)

其中,  $W_i$  表示第  $i$  项指标的权重,  $A_{ij}$  表示第  $j$  项技术第  $i$  项指标的综合评价值,  $Z_j$  为该项技术发展应用条件的综合评估值,  $Z$  值越大,代表现阶段该项技术越具有较好的推广应用条件. 根据  $Z_j$  值,将技术推广应用条件水平划分为 3 个等级:好( $3 \geq Z \geq 2.5$ )、较好( $2.5 > Z \geq 2$ )、一般( $2 > Z \geq 1$ ).

2 结果与分析

2.1 低碳农业技术现状水平分析

2.1.1 减排固碳效应情况

根据专家判定结果,42 项技术中减排固碳效应为两星( \*\* )的有 22 项,占 52.38%,减排固碳效应为三星( \*\*\* )的有 17 项,占 40.48%(表 5),即除选育低排放品种、多功能舔砖饲喂、异位发酵床等 3 项技术减排固碳效应较低外,其余 92% 以上的技术具有较好的减排固碳效应,在低碳农业发展中值得进行推广应用.

表 5 低碳农业技术的减排固碳效应情况

| 序号 | 低碳农业技术         | 减排固碳效应 |        |      |       |      |       |
|----|----------------|--------|--------|------|-------|------|-------|
|    |                | ***    |        | **   |       | *    |       |
|    |                | 数量/项   | 占比/%   | 数量/项 | 占比/%  | 数量/项 | 占比/%  |
| 一  | 稻田甲烷减排技术       | 2      | 18.18  | 9    | 81.82 | 0    | 0.00  |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 4      | 100.00 | 0    | 0.00  | 0    | 0.00  |
| 三  | 保护性耕作固碳技术      | 2      | 50.00  | 2    | 50.00 | 0    | 0.00  |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 2      | 33.33  | 4    | 66.67 | 0    | 0.00  |
| 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 2      | 33.33  | 2    | 33.34 | 2    | 33.33 |
| 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 1      | 14.29  | 5    | 71.42 | 1    | 14.29 |
| 七  | 农业机械节能减排技术     | 4      | 100.00 | 0    | 0.00  | 0    | 0.00  |
|    | 合计             | 17     | 40.48  | 22   | 52.38 | 3    | 7.14  |

2.1.2 技术成熟度分析

根据专家判定结果,42 项技术中技术成熟度为三星(\*\*\* )的有 12 项,占 28.57%,技术成熟度为两星(\*\* )的有 25 项,占 59.52%(表 6).可见目前技术成熟度主要位于居中水平,整体还不够高,尤其是低排放品种选育、农业机械节能减排、秸秆炭化还田等技术,具有较大的提升空间,急需进一步完善科技创新体制,整合低碳农业技术研发力量,搭建低碳农业技术研发平台,加大低碳农业技术研发投入,突破低碳农业发展技术瓶颈.

表 6 低碳农业技术的技术成熟度分析

| 序号 | 低碳农业技术         | 技术成熟度 |       |      |        |      |       |
|----|----------------|-------|-------|------|--------|------|-------|
|    |                | ***   |       | **   |        | *    |       |
|    |                | 数量/项  | 占比/%  | 数量/项 | 占比/%   | 数量/项 | 占比/%  |
| 一  | 稻田甲烷减排技术       | 3     | 27.27 | 8    | 72.73  | 0    | 0.00  |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 2     | 50.00 | 2    | 50.00  | 0    | 0.00  |
| 三  | 保护性耕作固碳技术      | 0     | 0.00  | 4    | 100.00 | 0    | 0.00  |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 2     | 33.33 | 3    | 50.00  | 1    | 16.67 |
| 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 1     | 16.67 | 4    | 66.66  | 1    | 16.67 |
| 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 4     | 57.14 | 3    | 42.86  | 0    | 0.00  |
| 七  | 农业机械节能减排技术     | 0     | 0.00  | 1    | 25.00  | 3    | 75.00 |
|    | 合计             | 12    | 28.57 | 25   | 59.52  | 5    | 11.91 |

2.1.3 环境适应性分析

从专家判定结果可知,42 项技术中环境适应性为一星(\* )的有 5 项,占比为 11.905%,环境适应性为两星(\*\* )的有 32 项,占比为 76.19%(表 7).可见,现有低碳农业技术措施在推广应用中不同程度受到区域内自然环境或生产条件的制约影响,尤其是半旱式、异位发酵床、秸秆炭化还田等技术受环境的制约影响较大.主要是我国各地区光、热、水等自然条件存在明显差异,同一品种、技术在不同地区推广应用会呈现不同特点,无法进行简单的复制,必须结合当地实际进行品种、技术的集成优化.

表 7 低碳农业技术的环境适应性分析

| 序号 | 低碳农业技术         | 环境适应性 |        |      |        |      |        |
|----|----------------|-------|--------|------|--------|------|--------|
|    |                | ***   |        | **   |        | *    |        |
|    |                | 数量/项  | 占比/%   | 数量/项 | 占比/%   | 数量/项 | 占比/%   |
| 一  | 稻田甲烷减排技术       | 0     | 0.00   | 10   | 90.91  | 1    | 9.09   |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 2     | 50.00  | 2    | 50.00  | 0    | 0.00   |
| 三  | 保护性耕作固碳技术      | 0     | 0.00   | 4    | 100.00 | 0    | 0.00   |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 1     | 16.67  | 4    | 66.66  | 1    | 16.67  |
| 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 0     | 0.00   | 5    | 83.33  | 1    | 16.67  |
| 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 2     | 28.57  | 4    | 57.14  | 1    | 14.29  |
| 七  | 农业机械节能减排技术     | 0     | 0.00   | 3    | 75.00  | 1    | 25.00  |
|    | 合计             | 5     | 11.905 | 32   | 76.19  | 5    | 11.905 |

2.1.4 社会适应性分析

从专家判定结果可知,42 项技术中社会适应性为一星(\* )的有 4 项,占比为 9.524%,社会适应性为两星(\*\* )的有 34 项,占比为 80.952%(表 8).可见,现有低碳农业技术措施在推广应用中不同程度受到传统行为、社会机制或现行法规以及经济因素的制约影响,尤其是适量的生物炭还田、复式智能农机装备、秸秆炭化还田等技术受社会因素的制约影响较大.主要原因在于当前农民低碳意识淡薄,掌握低碳农业技

术的能力比较欠缺;技术推广应用机制不够健全,缺乏完善、简单且易操作的低碳农业技术清单及实施手册;部分技术操作繁琐,使劳动力投入或生产成本有所增加;农业碳汇价值实现路径缺乏,使用低碳农业技术带来的碳汇效应难以得到经济补偿;同时缺乏相应的激励和监督考核机制,难以调动政府、农民、企业等各类主体的积极性.

表 8 低碳农业技术的社会适应性分析

| 序号 | 低碳农业技术         | 社会适应性 |       |      |        |      |       |
|----|----------------|-------|-------|------|--------|------|-------|
|    |                | ***   |       | **   |        | *    |       |
|    |                | 数量/项  | 占比/%  | 数量/项 | 占比/%   | 数量/项 | 占比/%  |
| 一  | 稻田甲烷减排技术       | 0     | 0.00  | 10   | 90.91  | 1    | 9.09  |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 1     | 25.00 | 3    | 75.00  | 0    | 0.00  |
| 三  | 保护性耕作固碳技术      | 0     | 0.00  | 4    | 100.00 | 0    | 0.00  |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 1     | 16.67 | 4    | 66.66  | 1    | 16.67 |
| 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 2     | 33.33 | 3    | 50.00  | 1    | 16.67 |
| 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 0     | 0.00  | 7    | 100.00 | 0    | 0.00  |
| 七  | 农业机械节能减排技术     | 0     | 0.00  | 3    | 75.00  | 1    | 25.00 |
|    | 合计             | 4     | 9.524 | 34   | 80.952 | 4    | 9.524 |

2.1.5 当前应用规模情况

根据专家判定结果,42 项技术中,仅有畜禽粪便管理温室气体减排技术中的人工干清粪、液体沼气发酵等 2 项技术在重庆的推广应用较为广泛,其余近 60%的技术应用规模较小,可通过加大低碳农业技术的推广用来促进重庆低碳农业发展(表 9).

表 9 低碳农业技术的当前应用规模情况

| 序号 | 低碳农业技术         | 当前应用规模 |       |      |       |      |        |
|----|----------------|--------|-------|------|-------|------|--------|
|    |                | ***    |       | **   |       | *    |        |
|    |                | 数量/项   | 占比/%  | 数量/项 | 占比/%  | 数量/项 | 占比/%   |
| 一  | 稻田甲烷减排技术       | 0      | 0.00  | 3    | 27.27 | 8    | 72.73  |
| 二  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 0      | 0.00  | 1    | 25.00 | 3    | 75.00  |
| 三  | 保护性耕作固碳技术      | 0      | 0.00  | 1    | 25.00 | 3    | 75.00  |
| 四  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 0      | 0.00  | 3    | 50.00 | 3    | 50.00  |
| 五  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 0      | 0.00  | 4    | 66.67 | 2    | 33.33  |
| 六  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 2      | 28.57 | 4    | 57.14 | 1    | 14.29  |
| 七  | 农业机械节能减排技术     | 0      | 0.00  | 0    | 0.00  | 4    | 100.00 |
|    | 合计             | 2      | 4.76  | 16   | 38.10 | 24   | 57.14  |

2.2 低碳农业技术发展应用条件综合水平

根据评价结果(表 10),42 项技术中发展应用条件水平主要位于  $2.5 > Z \geq 2$  较好水平区间,占 61.90%;其次是  $2 > Z \geq 1$  一般水平区间,占 21.43%;达到  $3 \geq Z \geq 2.5$  最高水平区间的技术相对较少,占 16.67%. 从种植、养殖、能源消耗 3 个方面来看,低碳农业技术发展应用条件水平位于  $Z \geq 2$  以上的分别占 88.00%,76.923%,25.00%,可见目前种植方面低碳农业技术的推广应用条件最好,其次是养殖方面,能源消耗方面低碳技术推广应用条件相对较差. 具体来看,种植方面有 18 项低碳农业技术发展应用条件水平位于  $2.5 > Z \geq 2$  较好水平区间,占 72.00%;养殖方面有 7 项低碳农业技术发展应用条件水平位于  $2.5 > Z \geq 2$  较好水平区间,占 53.846%;而能源消耗方面则主要位于  $2 > Z \geq 1$  一般水平区间,占 75%.

表 10 低碳农业技术发展应用条件综合水平评价结果

| 序号 | 技术名称           | 3≥Z≥2.5                     |     |        | 2.5>Z≥2                                                                             |     |        | 2>Z≥1                                        |     |        |
|----|----------------|-----------------------------|-----|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------|----------------------------------------------|-----|--------|
|    |                | 综合水平                        | 数量/ | 占比/    | 综合水平                                                                                | 数量/ | 占比/    | 综合水平                                         | 数量/ | 占比/    |
|    |                | 值 Z                         | 项   | %      | 值 Z                                                                                 | 项   | %      | 值 Z                                          | 项   | %      |
| 一  | 种植             |                             |     |        |                                                                                     |     |        |                                              |     |        |
| 1  | 稻田甲烷减排技术       | 节水灌溉(2.6)                   | 1   | 9.09   | 种植低排品种(2)、稻渔复合种养(2)、直播稻(2)、再生稻(2.4)、少免耕(2)、氮肥减施(2)、有机肥堆肥发酵后还田(2.4)、控释肥或配施生物抑制剂(2.2) | 8   | 72.73  | 半旱式(1.8)、适量的生物炭还田(1.8)                       | 2   | 18.18  |
| 2  | 农用地氧化亚氮减排技术    | 测土配方施肥(3)、氮肥的混施、深施或条施等(2.6) | 2   | 50.00  | 缓控释肥(2.4)、水肥一体化灌溉(2.2)                                                              | 2   | 50.00  |                                              |     | 0.00   |
| 3  | 保护性耕作固碳技术      |                             | 0   | 0.00   | 少耕(2.2)、休耕(2)、免耕播种(2)、轮作(2.2)                                                       | 4   | 100.00 |                                              | 0   | 0.00   |
| 4  | 农作物秸秆还田固碳技术    | 秸秆覆盖还田(3)                   | 1   | 16.67  | 秸秆粉碎翻压还田(2)、秸秆基质化利用后还田(2)、秸秆堆沤还田(2)、秸秆过腹还田(2.4)                                     | 4   | 66.66  | 秸秆炭化还田(1.4)                                  | 1   | 16.67  |
|    | 小计             |                             | 4   | 16.00  |                                                                                     | 18  | 72.00  |                                              | 3   | 12.00  |
| 二  | 养殖             |                             |     |        |                                                                                     |     |        |                                              |     |        |
| 5  | 反刍动物肠道甲烷减排技术   | 合理搭配精粗饲料比例(2.8)             | 1   | 16.67  | 优化饲料品种(2.2)、饲料加工技术(2)、瘤胃微生物调控(2.2)                                                  | 3   | 50.00  | 选育低排放品种(1)、多功能舔砖饲喂(1.8)                      | 2   | 33.33  |
| 6  | 畜禽粪便管理温室气体减排技术 | 人工干清粪(2.6)、液体沼气发酵(2.6)      | 2   | 28.57  | 自动(机械)干清粪(2.2)、高床养殖(2)、固体粪便堆肥(2.4)、粪水还田(2.4)                                        | 4   | 57.14  | 异位发酵床(1.6)                                   | 1   | 14.29  |
|    | 小计             |                             | 3   | 23.077 |                                                                                     | 7   | 53.846 |                                              | 3   | 23.077 |
| 三  | 能源消耗           |                             |     |        |                                                                                     |     |        |                                              |     |        |
| 7  | 农业机械节能减排技术     |                             | 0   | 0.00   | 节种节水节能节肥节药的农机化技术(2.2)                                                               | 1   | 25.00  | 复式智能农机装备(1.6)、节能型农机装备(1.8)、清洁能源智能农业机械装备(1.7) | 3   | 75.00  |
|    | 小计             |                             | 0   | 0.00   |                                                                                     | 1   | 25.00  |                                              | 3   | 75.00  |
|    | 合计             |                             | 7   | 16.67  |                                                                                     | 26  | 61.90  |                                              | 9   | 21.43  |

2.3 低碳农业分区分级推进技术路径

低碳作为一种经济发展理念融入现代农业产业之中是多项技术集成应用的过程<sup>[18]</sup>。因此，在梳理重庆农业生产特点的基础上，研究提出水稻油菜、玉米大豆等粮食主产区“双增双减”，生猪家禽、草食牲畜等养殖集中区“稳能减排”，生态脆弱区“提能固碳”综合技术路径，并根据技术发展应用条件水平提出分级主推技术，为重庆农业生产节能减排，扎实做好“双碳”工作提供路径参考(表 11)。

表 11 低碳农业分区分级推进技术路径

| 分区        |                                                                                                                            | 低碳农业技术路径                                                    | 分级主推技术                     |                                                                                                                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                                                                                                            |                                                             | $3\geq Z\geq 2.5$          | $2.5>Z\geq 2$                                                                                                          |
| 一         | 粮食主产区                                                                                                                      | “双增双减”综合技术路径                                                |                            |                                                                                                                        |
| 水稻油菜主产区   | 江津、合川、永川、涪陵(水稻)、开州、大足、万州、忠县、铜梁、垫江、南川、潼南、荣昌、长寿、綦江、云阳、丰都、秀山、酉阳、石柱、黔江、璧山(水稻)、梁平、武隆、奉节、巫山、巫溪、彭水、万盛经开区(水稻)                      | 碳增汇技术：保护性耕作固碳技术、农作物秸秆还田固碳技术<br>碳减排技术：稻田甲烷减排技术、农业机械节能减排技术    | 节水灌溉、秸秆覆盖还田                | 有机肥堆肥发酵后还田、再生稻、秸秆过腹还田、控释肥或配施生物抑制剂、少耕、轮作、节种节水节能节肥节药的农机化技术、种植低排品种、稻渔复合种养、直播稻、少免耕、氮肥减施、秸秆粉碎翻压还田、秸秆基质化利用后还田、秸秆堆沤还田、休耕、免耕播种 |
|           |                                                                                                                            |                                                             |                            |                                                                                                                        |
| 玉米大豆主产区   | 合川、开州、彭水、江津、酉阳、涪陵、云阳、丰都、万州、垫江、奉节、綦江、长寿、秀山、永川、潼南(玉米)、石柱、大足、忠县、铜梁、黔江、巫溪、南川、荣昌、璧山(玉米)、梁平、武隆、巫山、城口(玉米)、万盛经开区(玉米)、巴南(大豆)、渝北(大豆) | 碳增汇技术：保护性耕作固碳技术、农作物秸秆还田固碳技术<br>碳减排技术：农用地氧化亚氮减排技术、农业机械节能减排技术 | 测土配方施肥、秸秆覆盖还田，氮肥的混施、深施或条施等 | 缓控释肥、秸秆过腹还田、水肥一体化灌溉、节种节水节能节肥节药的农机化技术、少耕、轮作、秸秆粉碎翻压还田、秸秆基质化利用后还田、秸秆堆沤还田、休耕、免耕播种                                          |
|           |                                                                                                                            |                                                             |                            |                                                                                                                        |
| 二         | 养殖集中区                                                                                                                      | “稳能减排”综合技术路径                                                |                            |                                                                                                                        |
| 生猪家禽养殖集中区 | 合川、开州、云阳、万州、涪陵、江津、黔江(生猪)、忠县、酉阳、潼南、奉节、垫江、梁平、巫溪、南川、彭水(生猪)、长寿、荣昌、巫山(生猪)、武隆(生猪)、丰都、綦江、铜梁、大足、秀山、永川、石柱(生猪)、巴南(生猪)、璧山(家禽)、城口(家禽)  | 碳减排技术：畜禽粪便管理温室气体减排技术                                        | 人工干清粪、液体沼气发酵               | 自动(机械)干清粪、高床养殖、固体粪便堆肥、粪水还田                                                                                             |
|           |                                                                                                                            |                                                             |                            |                                                                                                                        |
| 草食牲畜养殖集中区 | 丰都、酉阳、彭水、云阳、石柱、秀山、黔江、忠县、武隆、奉节、梁平、涪陵、万州、开州、南川、城口、合川、巴南、渝北、长寿、綦江、荣昌、垫江、巫溪、巫山、大足、江津                                           | 碳减排技术：反刍动物肠道甲烷减排技术、畜禽粪便管理温室气体减排技术                           | 合理搭配精粗饲料比例、人工干清粪、液体沼气发酵    | 优化饲料品种、饲料加工、瘤胃微生物调控、自动(机械)干清粪、高床养殖、固体粪便堆肥、粪水还田                                                                         |
|           |                                                                                                                            |                                                             |                            |                                                                                                                        |
| 三         | 生态脆弱区                                                                                                                      | “提能固碳”综合技术                                                  |                            |                                                                                                                        |
| 生态脆弱区     | 城口、巫溪、巫山、开州、云阳、奉节、万州、石柱、丰都、彭水、黔江、酉阳、秀山、武隆、南川、万盛经开区、綦江、江津                                                                   | 碳增汇技术：保护性耕作固碳技术                                             |                            | 少耕、休耕、免耕播种、轮作                                                                                                          |
|           |                                                                                                                            |                                                             |                            |                                                                                                                        |

注：粮食、养殖分区主要参考《重庆市粮油产业发展“十四五”规划》《重庆市畜牧业发展“十四五”规划(2021—2025 年)》；“涪陵(水稻)”其中括号表示该区县主要布局水稻，分区中括号表意相同。

### 2.3.1 粮食主产区“双增双减”综合技术路径

根据重庆水稻油菜、玉米大豆等主要种植业,分别构建“双增双减”综合技术路径,实现粮食主产区生产“固碳减排和稳粮增收”多重目标。在江津、合川等 29 个区县的水稻油菜主产区,碳增汇方面重点采取少耕、休耕等保护性耕作固碳技术,水稻秸秆覆盖还田、粉碎翻压还田、堆沤还田等秸秆还田固碳技术,因地制宜布局秸秆还田示范点(示范片)和有机肥生产工程,建设秸秆还田示范乡镇,增强土壤固碳能力。碳减排方面,一是推广水田间歇灌溉等节水灌溉技术;二是在适宜的地区推广再生稻、稻田复合种养等种植模式;三是积极采取有机肥堆肥发酵后还田、氮肥减施、控释肥或配施生物抑制剂等技术;四是在耕作措施方面进一步推广少免耕、直播稻等技术措施,可在沿江沿河的低海拔区域探索发展直播优质晚稻;五是推进对低排品种的选育和推广种植;六是加强农机农艺结合,采取节种节水节能节肥节药农机化技术,减少稻田甲烷及农机耗能排放。

在合川、开州等 32 个区县的玉米大豆主产区,“双增”方面重点采取少耕、免耕、轮作等保护性耕作固碳技术,玉米油菜秸秆覆盖还田、粉碎翻压还田、堆沤还田等秸秆还田固碳技术,增强土壤固碳能力。“双减”方面一是大力推广测土配方施肥技术,在适宜地区积极推广应用大配方,根据土壤氮素含量测定结果以及农作物的需肥规律确定施肥量,避免过量施肥,提高氮肥利用率;二是推广氮肥的混施、深施等施肥技术,减少氮肥的径流、氨挥发和反硝化损失,提高肥料利用率,减少氧化亚氮的排放;三是改进肥料种类,推广缓控释肥;四是推广滴灌施肥等水肥一体化灌溉技术,促进水肥耦合,提高肥料的利用率并减少氧化亚氮排放;五是推广节种节水节能节肥节药农机化技术,减少土壤氧化亚氮及农机耗能排放。

### 2.3.2 养殖集中区“稳能减排”综合技术路径

根据重庆生猪家禽、草食牲畜等养殖业发展布局特点,在保持畜产品供给持续稳定的基础上,分别构建“稳能减排”综合技术路径,实现“主要畜产品生产供应稳定增长、养殖温室气体明显减排”多重目标。对于合川、开州等 30 个区县的生猪家禽养殖集中区,尤其是重庆荣昌猪产业集群,以及成渝地区双城经济圈畜禽产业带、长江沿线生态畜禽产业带、渝湘高速沿线生态畜禽产业带等 3 条畜禽养殖规模化产业带,在减排方面要重点加快畜禽养殖废弃物资源化利用。一是优化畜舍清粪方式,在规模化养殖场积极推广自动(机械)干清粪、高床养殖等技术;二是大力推进液体沼气发酵、固体粪便堆肥、粪水还田等技术,其中集约化养殖场可因地制宜推广沼气工程技术,中小规模养殖场可推广就地堆肥技术,散养密集区可实行畜禽粪污分户收集、集中处理。同时,积极探索绿色生态循环农业发展模式,大力推广种养轮作—原位消纳循环模式、畜禽养殖—有机肥加工—有机果蔬种植、以沼气工程为纽带的“四位一体”种养循环模式等生态循环农业模式,形成畜禽养殖粪污就地消纳、种养产业循环发展的良好格局。

对于丰都、酉阳等 27 个区县的草食牲畜养殖集中区,尤其是武陵山区草食牲畜产业带、秦巴山区草食牲畜产业带等草食牲畜规模化养殖区域,重点推广合理搭配精粗饲料比例技术,扩大精细化饲养,降低反刍动物消化道中微生物在分解纤维素过程中的甲烷排放;积极优化饲料品种,推进紫花苜蓿、白三叶草、黑麦草、甜高粱等优质饲草料的种植和饲喂;推广秸秆青贮、化学处理、物理加工等饲料加工技术,提高秸秆的适口性和消化率;推广添加益生菌等瘤胃微生物调控技术,改善动物胃肠道微生物生态平衡,提高动

物健康和生产性能,降低动物干物质采食量和代谢体重基础的甲烷排放量。同时,大力推广人工干清粪、液体沼气发酵、自动(机械)干清粪、固体粪便堆肥等畜禽粪便管理温室气体减排技术。

2.3.3 生态脆弱区“提能固碳”综合技术路径

重庆集大农村、大山区、大库区为一体,丘陵、山地占全市总面积的比重为 90.93%。重庆市第三次国土调查数据显示,全市 187.02 万  $\text{hm}^2$  耕地中大于  $15^\circ$  以上坡地的耕地面积为 73.2 万  $\text{hm}^2$ ,占 39.14%。尤其是位于渝东南武陵山区城镇群和渝东北三峡库区城镇群的部分地区,自然条件差、石漠化程度较深、水土流失严重,生态环境脆弱。对于生态脆弱区,下一步要继续坚定不移走生态优先绿色发展之路,构建“提能固碳”综合技术路径,通过加强高标准农田建设,推进农田宜机化改造,大力推广少耕、休耕、免耕、轮作等保护性耕作技术,增强土壤固碳能力,实现“耕地综合生产能力提升、耕地质量保护与提升”多重目标。

3 促进低碳农业技术发展应用的对策建议

3.1 加快低碳农业技术创新步伐

1) 成立丘陵山区低碳农业技术创新联盟。成立由重庆市内从事低碳农业发展管理、低碳农业研究及成果推广应用的政府、科研院所、高校及此领域相关企业等机构为理事单位,市外相关院校和科研机构为联动单位,集联合性、专业性和行业性于一体的重庆丘陵山区低碳农业技术创新联盟,专门从事丘陵山地低碳农业技术尤其是碳减排颠覆性技术的研发与应用,提升丘陵山区低碳农业技术自主创新能力。

2) 加大低碳农业技术研发投入支持力度。充分发挥集科研、推广、使用为一体的涉农龙头企业在低碳农业科技创新领域的作用,促进研发投入由政府为主向政府与企业联合投入转变,建立健全政府与企业联合投入机制。建议由市科技部门、市农业农村部门设立低碳农业科技创新专项,采取“揭榜挂帅”、竞争择优、定向组织等多样化方式,鼓励支持创新型领军企业、研发型企业、高新技术企业、农业科技型企业 and 高校院所等各类创新主体,围绕丘陵山区低碳农业发展开展重大关键核心技术攻关。

3.2 加快低碳农业技术的推广应用

1) 制定简单易懂的低碳农业发展技术指导手册。根据对碳增汇、碳减排技术的减排固碳效应、技术成熟度、环境适应性、社会适应性等发展应用条件的综合评价结果,选择减排固碳效应好、技术成熟度高、社会环境适应性强、应用潜力大的技术制定优先发展技术目录,并采取文字、图表、图片的形式明确每项技术的具体要点、预期效果、预期成本等,编制发布“低碳农业行动”指南,为农业经营者提供简单易懂的低碳农业发展技术指导手册,促进低碳农业行动的落地。

2) 设立低碳农业技术推广示范项目。在依托现有农业农村部门、科技部门等关于生态农业、废弃物资源化利用、农机等相关项目资金的基础上,建议增设低碳农业技术推广示范项目专项资金,共同用于碳增汇碳减排技术推广示范点,粮油主产区、养殖集中区、生态脆弱区零碳高科技农业产业示范园,以及低碳农业发展试验示范区的建设。通过 3—5 年建设,因地制宜总结形成低碳农业发展模式、标准和实施路径,提炼推广一批低碳农业先进技术,以示范点、示范园、试验示范区为引领逐步辐射带动全域低碳农业发展。

3) 建立多元化的低碳农业技术推广模式。首先强化政府主导农技推广体系建设, 加强对基层农业技术推广高素质人才的引进与培养, 加强各层级农业技术推广部门之间的协同; 其次发挥科研院所、高校、科技型龙头企业等研发主体在低碳农业技术推广应用中的作用, 建立“农业科研—科研成果产业化—农技推广应用”联动机制; 再次大力鼓励支持行业协会、信息服务组织、农民教育和培训组织、技术转化中介组织等农业技术服务型组织<sup>[19]</sup>向农业园区、农民、涉农企业等技术应用机构和组织提供最新的农业技术、学习培训机会等, 积极推动低碳农业技术的推广应用。

### 3.3 加快低碳农业技术发展环境建设

1) 强化低碳农业发展顶层设计。制定低碳农业科技研发与推广应用的发展规划, 科学编制市、区县、街道(镇、乡)各级低碳农业发展规划和实施方案, 同时根据低碳农业技术推广示范项目编制低碳农业示范点、零碳高科技农业产业示范园、低碳农业发展试验示范区的规划和实施方案, 形成多层次的低碳农业发展规划体系。在规划中加强科学合理的统计监测指标和考核评价指标设置<sup>[20]</sup>, 发挥规划的导向引领作用, 促进低碳农业有序发展。

2) 建立健全低碳农业发展制度环境。首先是完善奖励与激励制度, 加强对低碳农业技术的原始创新、集成创新和引进、消化、吸收、再创新给予税收优惠和专项奖励, 建立低碳农业生产与消费的税收优惠政策, 制定针对低碳农业发展的财政补贴政策以及支持低碳农业生产的优惠利率、贴息贷款等金融政策。其次是探索建立碳汇产品价值实现机制, 加快构建农业碳排放核算的方法学, 形成一套管理部门、生产主体、碳交易主体共认的核算方法体系, 并积极推动将农业纳入碳排放交易市场<sup>[3]</sup>, 按照先单项后全面、先基础后复杂、先试点后普及的原则, 循序推进不同主体、不同产业进入碳排放交易市场<sup>[21]</sup>。再次是建立监督考核制度, 建立农业碳中和核算和监测体系, 定期编制重点区域和重点企业温室气体排放清单, 形成农业温室气体减排固碳年度报告和核查制度, 并将低碳农业发展纳入地方政府和重点企业的考核指标中, 逐步形成减排固碳协同的考核激励机制。

3) 营造低碳农业发展氛围环境。充分利用网络、广播、电视、报刊等传播媒介, 公益广告, 典型示范, “手把手”培训等方式<sup>[19]</sup>, 以及健全食品相关立法、健全农产品的绿色消费制度体系等, 逐步形成政府—农民(经营主体)—消费者自上而下的低碳发展理念<sup>[22]</sup>, 让低碳生产、低碳生活成为全民自觉的行为。

### 参考文献:

- [1] 王学婷, 张俊飏. 双碳战略目标下农业绿色低碳发展的基本路径与制度构建 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 516-526.
- [2] 姜涛, 刘瑞, 边卫军. “十四五”时期中国农业碳排放调控的运作困境与战略突围 [J]. 宁夏社会科学, 2021(5): 66-73.
- [3] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径 [J]. 改革, 2021(5): 29-37.
- [4] 陈庆, 李长江, 张俊丽, 等. 保护性耕作农田固碳减排效应分析——以陕西户县、大荔和临渭区为例 [J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1686-1695.
- [5] 陈松文, 刘天奇, 曹凑贵, 等. 水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略 [J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 3-12.
- [6] 卢维盛, 廖宗文, 张建国, 等. 不同水旱轮作方式对稻田甲烷排放影响的研究 [J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 200-202.

[7] 李迎春. 中国农业氧化亚氮排放及减排潜力研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

[8] 曹珍, 廖新梯. 家畜胃肠道甲烷减排技术进展 [J]. 家畜生态学报, 2011, 32(4): 1-8.

[9] 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1): 60-65.

[10] 何念鹏, 王秋凤, 刘颖慧, 等. 区域尺度陆地生态系统碳增汇途径及其可行性分析 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 788-794.

[11] 金书秦, 李颖, 胡浚哲. 农业碳减排的技术与政策 [J]. 开放导报, 2021(6): 97-104.

[12] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 500-515.

[13] 李建政. 农田生态系统温室气体减排技术评价及实证分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

[14] 周艳, 邓凯东, 董利锋, 等. 反刍家畜肠道甲烷的产生与减排技术措施 [J]. 家畜生态学报, 2018, 39(4): 6-10, 54.

[15] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.

[16] 江雨倩, 李虎, 王艳丽, 等. 滴灌施肥对设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响及减排贡献 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1616-1624.

[17] 刘恒新, 李斯华, 何进. 美国低碳农业机械化技术发展及对中国的启示 [J]. 世界农业, 2012(6): 7-11.

[18] 刘娟, 谢莉娇. 发达国家和地区低碳农业技术锁定效应解除路径 [J]. 世界农业, 2013(11): 40-43, 47.

[19] 周利秋, 吴玲. 农业技术创新体系带动低碳农业发展问题研究 [J]. 东北农业大学学报(社会科学版), 2015, 13(5): 24-30.

[20] 柯福艳, 黄伟, 毛小报. 我国低碳农业发展技术路径及支撑体系研究 [J]. 浙江农业学报, 2012, 24(4): 727-732.

[21] 高鸣, 张哲晰. 碳达峰、碳中和目标下我国农业绿色发展的定位和政策建议 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(1): 24-31.

[22] 金辰, 孙波, 赵其国, 等. 我国发展低碳农业的政策、法规和技术体系分析 [J]. 土壤, 2014, 46(1): 7-14.

责任编辑 任剑乔