中国农业大学学报　2024,29(2):192-204
Journal of China Agricultural University　http://zgnydxxb.ijournals.cn

王如玉,肖海峰. 种养结合对肉羊养殖减排增效的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(02):192-204.
WANG Ruyu,XIAO Haifeng. Effect of combination of planting and breeding on the emission reduction and efficiency of mutton sheep breeding[J]. *Journal of China Agricultural University*,2024,29(02):192-204.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.18

种养结合对肉羊养殖减排增效的影响

王如玉[1,2]　肖海峰[1*]
(1. 中国农业大学 经济管理学院,北京 100083;
2. 天津市农业科学院 农村经济与区划研究所,天津 300192)

摘　要　针对种养结合生产方式能否有效促进肉羊养殖减排增效问题,采用Super-SBM模型和处理效应模型,就种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响及影响机制进行研究。结果表明:一方面,与非种养结合生产方式相比,种养结合生产方式能够提高肉羊养殖环境技术效率,且较高程度种养结合生产方式对养殖户肉羊养殖环境技术效率的提升作用更为有效;另一方面,种养结合生产方式通过降低饲草料投入、提升肉羊出栏活重和减少碳排放来提升肉羊养殖环境技术效率。针对上述结论,提出加强种养结合技术研发及推广,建立养殖法规政策的绿色导向机制、提高区域种养结合水平等政策建议。

关键词　种养结合; 环境技术效率; 处理效应模型; 面源污染; 碳排放
中图分类号　F326.3　　**文章编号**　1007-4333(2024)02-0192-13　　**文献标志码**　A

Effect of combination of planting and breeding on the emission reduction and efficiency of mutton sheep breeding

WANG Ruyu[1,2], XIAO Haifeng[1*]
(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Institute of Rural Economics and Regionalization, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192, China)

Abstract　Aiming at whether the combined production mode of planting and breeding can effectively promote the emission reduction and efficiency of mutton sheep breeding, the Super-SBM model and treatment effect model are used to study the impact and influencing mechanism of planting and breeding combination on environmental technical efficiency of mutton sheep breeding. The results show that: On one hand, compared with non-combination of planting and breeding, the combination of planting and breeding can improve environmental technical efficiency of mutton sheep breeding. Compared with non-combination of planting and breeding mode, the higher degree of combination of planting and breeding mode is more effective in improving the environmental technical efficiency of mutton sheep breeding. On the other hand, the combination of planting and breeding can improve the environmental technical efficiency of mutton sheep breeding by reducing forage input, increasing live weight of mutton sheep and reducing carbon emissions. In conclusion, some policy suggestions, such as strengthening research and promotion of combination of planting and breeding technology, establishing the green oriented mechanism of aquaculture regulations and policies, and improving the level of regional cultivation, are put forward in this study.

收稿日期: 2023-05-08
基金项目: 农业农村部和财政部项目(CARS-39-22)
第一作者: 王如玉(ORCID:0009-0007-8528-2949),博士,E-mail: ruyu_wang@163.com
通讯作者: 肖海峰(ORCID:0009-0006-4863-1209),教授,博士生导师,主要从事农产品市场与政策研究,E-mail: haifengxiao@cau.edu.cn

Keywords　combination of planting and breeding; environmental technical efficiency; treatment effect model; non-point source pollution; carbon emission

随着畜牧业供给侧结构性改革的持续深化，我国畜禽产业快速发展，肉羊养殖规模也不断扩大。肉羊产业的发展，对改善居民膳食结构，缓解粮食供求矛盾，促进边疆少数民族地区稳定发展具有重要意义。但肉羊产业发展过程中，以生态环境污染、资源过量消耗、养殖户低收入为代价等问题没有彻底解决。巨大代价下取得的发展依然缺乏可持续性。种养结合具有低成本、抗风险、高单产、轻污染等优点[1]。种养结合作为农业绿色发展的重要方式、实现循环经济的重要手段，探究其对肉羊养殖减排增效的影响，有助于寻找出促进肉羊产业绿色高质量发展的“突破口”。

环境技术效率为兼顾资源环境投入与人类活动产出协调发展的生产率，能够有效衡量减排增效效果[2]。理论上，传统技术效率仅考虑了“市场性”的合意产出[3]；绿色生产率除了传统要素投入以外，将碳排放或者污染物总量、化学需氧量、总氮、总磷等作为非期望产出纳入到生产效率分析框架中[4-5]。关于绿色生产率测算方法，可归纳为参数估计法和非参数估计法 2 类。其中，参数估计法需事先确定生产函数形式，然后采用相应的技术手段对各参数系数进行估计，该估计方法以随机前沿生产函数为典型代表；非参数估计法则不需要确定生产函数形式，一般采用线性规划方式对绿色生产率进行测算，该估计方法以数据包络分析法为典型代表。现有研究对畜禽绿色生产率的测算多采用以数据包络法和指数法相结合的非参数法[5]。关于绿色生产率影响因素的研究方法主要有 Tobit 模型[6]、双向固定效应模型[7]、分位数回归模型[8]、广义最小二乘法[9]等。已有研究得出：环境规制增强[10]、禀赋结构优化、劳动力受教育程度提升[9,11]、物质劳动生产率提高[7]、机械化程度增加、高频率清粪[8]对畜禽绿色生产率有显著正向影响，而疫病风险和饲料结构不合理对其有显著的负向影响[7]。此外，朱宁等研究得出粪便堆肥自用对畜禽养殖绿色生产率影响并不显著[8]，而王善高等研究得出种养结合对小规模生猪养殖带来的污染有一定缓解作用，能够提升其环境效率[6]。综上所述，已有研究对畜禽绿色生产率投入产出指标选取与处理、测算方法、影响因素等进行了深入探讨，为本研究奠定了坚实基础，但是仍有进一步探究的空间：1）研究内容上，已有研究关于种养结合减排增效效果并未得出一致结论，且仅把种养结合作为虚拟变量纳入分析框架，然而对于种养结合生产方式并非只有采纳与否的区别，还存在采纳强度的差别，具体看，种养结合程度主要表现在：① 自种饲料在肉羊饲草料中的占比；② 肉羊粪便用作有机肥的比例，种养结合程度不同，其产生的范围经济及其对专业化生产的影响会有所差异。2）研究方法上，现有研究大多将种养结合视为外生变量，然而养殖户生产决策往往基于自身特征和比较优势，同时也会存在不可观测变量影响生产决策与生产效率[12]。

鉴于此，本研究旨在测算养殖户肉羊养殖环境技术效率的基础上，采用处理效应模型进行回归分析，探究种养结合生产方式对肉羊养殖环境技术效率的影响及影响机制，以期为进一步促进肉羊产业绿色发展提供政策建议。

1　理论分析与研究假说

关于种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响可以结合范围经济理解。在种养结合过程中，肉羊饲料来源并不唯一，具有一定的选择性。但养殖场户若要降低成本，则需选择能够适应范围经济的生产模式，即在同一过程当中可以实现生产要素的多样化且充分提高资源利用率。如果该户为种养结合户，则其生产效率和产出表示为：

$$Z=(x,y)$$

$$y=(y_1,y_2)$$

式中：Z 为生产效率；y 为产出变量；x 为投入变量。

假设有 n 个非种养结合户进行生产，则其生产率和产出表示为：

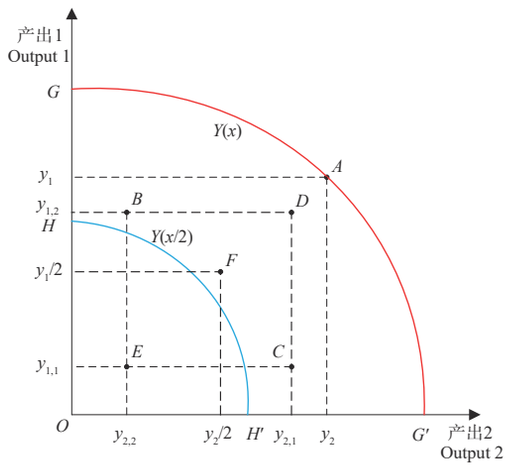
$$Z''=(x'',y'')$$

$$y''=(y_{1,n},y_{2,n})$$

$$x''=x/2$$

式中：Z'' 为生产效率；y'' 为产出变量；x'' 为投入变量。

图 1 示出种养结合户与非种养结合户生产效率的对比。投入量为 $x/2$ 时，非种养结合户（专业养殖户、专业种植户）的产出量距产量边界不完全一致。因此即使非种养结合户和原始种养结合养殖户的生产结果一致，由于非种养结合户的投入更



GG'，投入量为x时种养结合户的产量边界曲线；HH'，投入量为$x/2$时种养结合户的产量边界曲线。A，种养结合户产出量；B、C分别为非种养结合户（专业养殖户、专业种植户）产出量；D、E、F分别为$y_{1,2}$与$y_{2,1}$的交点、$y_{1,1}$与$y_{2,2}$的交点、$y_1/2$与$y_2/2$的交点，均无实际意义。y_1、y_2分别为种养结合户产品1、产品2的产出量；$y_{1,1}$、$y_{2,1}$分别为非种养结合户1产品1、产品2的产出量；$y_{1,2}$、$y_{2,2}$分别为非种养结合户2产品1、产品2的产出量。

GG', yield boundary curve of the combined breeding household when input is x; HH', yield boundary curve of farmers and growers when input is $x/2$. A, output set of combined breeding households; B, C, Output set of non-breeding combined households (professional farmers, professional growers); D, E and F are the intersection of $y_{1,2}$ with $y_{2,1}$, $y_{1,1}$ with $y_{2,2}$, and $y_1/2$ with $y_2/2$, which are of no practical significance. y_1, y_2 are the output of product 1 and product 2; $y_{1,1}$, $y_{2,1}$ are the output of product 1 and product 2 of non-breeding combined households; $y_{1,2}$, $y_{2,2}$ are the output of product 1 and product 2 of non-breeding combined households.

图1 种养结合户与非种养结合户生产效率对比

Fig. 1 Comparison of production efficiency of combined breeding households and non-combined breeding households

多，生产率会受到影响。但种养结合养殖户并不会受到该因素的影响，能保证其生产连续性。环境技术效率是兼顾经济利益和环境保护的效率。种养结合农牧系统内部可实现“物质循环与利用”[13]，改善资源利用率、降低生产成本、提高经济与环境效益[6,14]。而不同程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响存在一定差异。与非种养结合养殖户相比，不管何种程度种养结合一定程度上实现了范围经济，而范围经济会促进肉羊养殖环境技术效率的提升，且随着种养结合程度的加深，范围经济产生的正效应增强，对环境技术效率的提升作用增强。

基于此，本研究提出如下研究假说：

假说1a，与非种养结合相比，种养结合可以提高肉羊养殖环境技术效率。

假说1b，与非种养结合相比，较低及较高程度种养结合均可提高肉羊养殖环境技术效率，且较高程度种养结合对环境技术效率的提升作用更强。

图2示出种养结合影响肉羊养殖环境技术效率的机制。种养结合主要通过要素配置、期望产出和非期望产出影响肉羊养殖环境技术效率。1）种养结合通过要素配置影响肉羊养殖环境技术效率：①饲草料投入方面，肉羊养殖需要消耗大量的饲草料（饲草料是当下肉羊成本份额较大的投入要素），对于非种养结合户来说，从市场购买饲料需要花费较高成本；对于种养结合户来说，农田种植出来的农作物及其产品可作为饲料使用，这在一定程度上会减少商品饲料的购买。肉羊养殖户目前采用种养结合对肉羊养殖粪污资源化利用

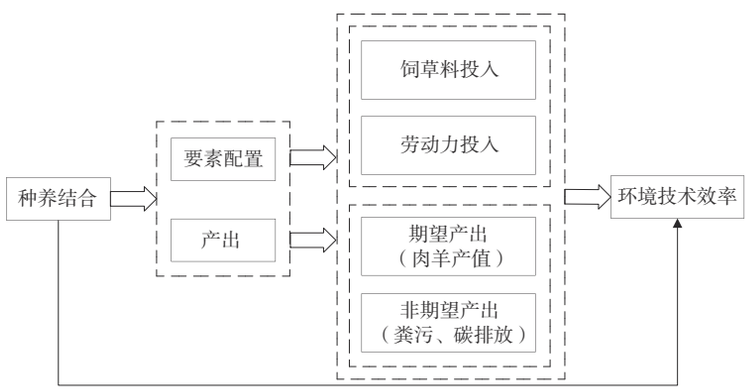


图2 种养结合影响肉羊养殖环境技术效率的机制

Fig. 2 Mechanism of combination of planting and breeding affecting environmental technical efficiency of mutton sheep breeding

的主要方式是肥料化，即用养殖粪污还田，在这过程中增加了粪污还田成本；肉羊粪污经过处理，可以资源化利用，转化为有机肥，这在一定程度上降低了农田化肥使用量和饲草料生产成本。②劳动力投入方面，种养结合由于扩大了农业经营范围，还可能导致养殖户对人力资本的投资，把剩余劳动力生产要素引入到饲草料种植中，优化劳动力配置。2）种养结合通过产出影响肉羊养殖环境技术效率：①期望产出方面，采用种养结合生产的饲草料质量较好，用来饲喂肉羊更有利于肉羊生长，提升肉羊产出；此外，目前草场资源限制下，大多地区大力推广肉羊舍饲养殖方式，因此采用种养结合实现废弃物污染的清理与资源化利用能为肉羊养殖营造良好圈舍环境，进而影响肉羊生产性能，改变养殖收益；②非期望产出方面，种养结合养殖户将肉羊养殖过程中产生的粪污经过处理后施用在农田，有效降低了肉羊养殖产后阶段面源污染的排放量，在一定程度上减少了羊粪等非期望产出造成的污染。同时，种养结合户可能会改善饲草料配比、饲养方式等，会对肉羊养殖产生的碳排放产生影响。

基于此，本研究提出如下研究假说：

假说 2，种养结合提升肉羊养殖环境技术效率的机制为改变要素配置、提升肉羊养殖期望产出、减少肉羊养殖非期望产出。

2　研究设计

2.1　模型设定

2.1.1　超效率 SBM 模型

基于松弛测度的 SBM 模型最早由 Tone[15] 提出。SBM 模型将投入和产出的松弛量直接放入目标函数中，剔除了松弛所造成的非效率因素；同时，SBM 模型能避免量纲不同和角度选择差异带来的偏差[16]，解决了非期望产出存在的生产效率评价问题。

假设肉羊养殖过程中有 n 个决策单元，每个决策单元均有 m 种投入、s_1 种期望产出和 s_2 种非期望产出向量，且向量 $\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{R}_m$，$\boldsymbol{y}^{\mathrm{g}}\in\boldsymbol{R}_{s_1}$、$\boldsymbol{y}^{\mathrm{b}}\in\boldsymbol{R}_{s_2}$，定义矩阵 $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{Y}^{\mathrm{g}}$、$\boldsymbol{Y}^{\mathrm{b}}$ 为：

$$\boldsymbol{X}=\left[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\ldots,\boldsymbol{x}_n\right]\in\boldsymbol{R}_{m\times n}>0$$

$$\boldsymbol{Y}^{\mathrm{g}}=\left[\boldsymbol{y}_1^{\mathrm{g}},\boldsymbol{y}_2^{\mathrm{g}},\ldots,\boldsymbol{y}_n^{\mathrm{g}}\right]\in\boldsymbol{R}_{s_1\times n}>0$$

$$\boldsymbol{Y}^{\mathrm{b}}=\left[\boldsymbol{y}_1^{\mathrm{b}},\boldsymbol{y}_2^{\mathrm{b}},\ldots,\boldsymbol{y}_n^{\mathrm{b}}\right]\in\boldsymbol{R}_{s_2\times n}>0$$

生产可能集 $\boldsymbol{p}$ 为：

$$\boldsymbol{p}=\left\{\left(\bar{\boldsymbol{x}},\bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{g}},\bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{b}}\right)\middle|\bar{\boldsymbol{x}}\geqslant\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{x}_j,\bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{g}}\leqslant\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{y}_j^{\mathrm{g}},\bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{b}}\geqslant\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{y}_j^{\mathrm{b}},\boldsymbol{v}\geqslant0\right\}$$

考虑非期望产出的可变规模报酬 Super-SBM 分式规划式为：

$$\rho^*=\min\frac{\dfrac{1}{m}\displaystyle\sum_{i=1}^{m}\bar{\boldsymbol{x}}_i\Big/\boldsymbol{x}_{i,\mathrm{o}}}{\dfrac{1}{s_1+s_2}\left(\displaystyle\sum_{r=1}^{s_1}\bar{\boldsymbol{y}}_r^{\mathrm{g}}\Big/\boldsymbol{y}_{r,\mathrm{o}}^{\mathrm{g}}+\sum_{l=1}^{s_2}\bar{\boldsymbol{y}}_l^{\mathrm{b}}\Big/\boldsymbol{y}_{l,\mathrm{o}}^{\mathrm{b}}\right)}\tag{1}$$

$$\text{s.t. }\bar{\boldsymbol{x}}\geqslant\sum_{j=1,\neq0}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{x}_j,\ \bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{g}}\leqslant\sum_{j=1,\neq0}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{y}_j^{\mathrm{g}},\ \bar{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{b}}\geqslant\sum_{j=1,\neq0}^{n}\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{y}_j^{\mathrm{b}},$$

$$\bar{\boldsymbol{x}}\geqslant\boldsymbol{x}_{\mathrm{o}},\ \bar{\boldsymbol{y}}_r^{\mathrm{g}}\leqslant\bar{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{g}},\ \bar{\boldsymbol{y}}_r^{\mathrm{b}}\geqslant\bar{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{b}},\ \sum_{j=1,\neq0}^{n}\boldsymbol{v}_j=1,\ \bar{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{g}}\geqslant0,\ \boldsymbol{v}\geqslant0$$

式中：ρ^* 为 Super-SBM 模型计算所得环境技术效率值；$\boldsymbol{x}$ 为投入向量；$\boldsymbol{y}^{\mathrm{g}}$ 为期望产出向量；$\boldsymbol{y}^{\mathrm{b}}$ 为非期望产出向量；$\boldsymbol{v}$ 为权重向量；量符号上的横线表示投入产出的投影值，下标 o 表示被评价决策单元。

2.1.2　处理效应模型

本研究重点分析种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响，建立如下模型：

$$Y_i=X_i\alpha+D_i\gamma+\varepsilon_i\tag{2}$$

$$D_i^*=Z_i\beta+\mu_i\tag{3}$$

式中：Y_i 为养殖户肉羊养殖环境技术效率；X_i 为衡量养殖户个人特征、肉羊养殖特征等外生变量；D_i 为养殖户种养结合选择变量；D_i^* 为潜变量；Z_i 为解释变量；α、γ 和 β 为待估计系数；ε_i 和 μ_i 为随机误差。

如果 D_i 外生，那么可以使用 OLS 直接进行估计；但养殖户是否选择种养结合不仅受资源禀赋、养殖特征、政府政策等可观测因素的影响，而且还受养殖户兴趣、合作意识、管理能力等不可观测因素的影响，存在样本“自选择”问题，且式（2）中 ε_i 包含的不可观测因素和式（3）中 μ_i 包含的不可观测因素，可能同时影响养殖户种养结合选择和肉羊养殖环境技术效率，从而导致 ε_i 和 μ_i 存在相关性。此外，由于养殖户初始禀赋存在差异，调研所获得养殖户样本并不是随机分布的，必须考虑养殖户选择种养结合的非随机分布所带来的样本选择偏差问题，否则可能会由于存在“选择偏差”，从而产生内生性问题。因此，本研究基于 Maddala 提出的处理效应模型[17]来进行研究。处理效应模型采用两步估计方法，其中，第一

步即养殖户选择方程采用Probit模型：

$$P\left(D_i=j|Z_i\right)=\frac{\exp\left(\alpha+\beta_i Z_i\right)}{1+\exp\left(\alpha+\beta_i Z_i\right)} \quad (4)$$

式中：$P(D_i=j/Z_i)$为养殖户选择种养结合j的概率；α和β为待估计系数。第二步环境技术效率估计方程，采用OLS估计方程：

$$Y_i=X_i\alpha+D_i\gamma+\rho\sigma_\varepsilon\lambda_i \quad (5)$$

式中：λ_i为个体i的风险；ρ为(ε_i, μ_i)的相关系数，如果估计结果显著，则说明存在不可观测因素引起的内生性问题，该模型可以剔除内生性，从而估计结果更为有效。

在运用MLE模型进行估计时，变量Z_i和X_i可以有重叠，但Z_i至少包含1个变量不在X_i中，可将其视为工具变量。在其他变量选取方面，本研究基于已有研究[18]的做法，基于选择方程选取变量。

2.2 数据来源

为分析养殖户种养结合参与情况以及种养结合对其肉羊养殖环境技术效率的影响，农业农村部肉羊产业监测预警团队2021年对山西、内蒙古、四川、新疆、辽宁、河北6省10个肉羊养殖优势县进行了调研。为了客观反映被调查地区肉羊种养结合具体情况，课题组采用多阶段随机抽样法获取调研样本。具体看，调研团队在每个省随机选取了1～2个肉羊养殖较为集中且种养结合模式较为典型的县(旗)，每个县(旗)随机选取了1～2个乡(镇、苏木)，每个乡(镇、苏木)随机选取了1～3个村(嘎查)，在每个村(嘎查)根据肉羊养殖规模情况来选取调研的样本户。总体看，调研样本能够代表当前中国肉羊生产的基本情况。问卷调查主要采用一对一的访谈方式，调查内容主要包括养殖户个人及家庭基本情况、肉羊养殖基本情况、粪污处理情况、饲草料种植情况和种养结合认知及参与情况等。通过6省调研共获取247份肉羊养殖户问卷，剔除前后矛盾等不符合要求的问卷，最后得到241份有效问卷，问卷有效率为97.57%。

2.3 变量说明

2.3.1 被解释变量

环境技术效率为肉羊养殖环境技术效率。在计算过程中包括期望产出、非期望产出和投入3个部分。由于收入更是养殖户选择肉羊养殖的逻辑起点，因此本研究选择单只出栏肉羊产值作为衡量养殖户肉羊养殖期望产出的指标。肉羊养殖非期望产出包括温室气体排放和面源污染两类。其中，面源污染指未经过处理直接排放到环境中的肉羊粪污所形成的污染，在问卷中的题项为“您家今年肉羊养殖过程中产羊粪多少m^3？其中利用(还田、售卖等)多少m^3？”，根据问卷题项得出养殖场户粪污废弃率，进而计算出单只出栏羊粪污所形成的污染，并参照潘丹等[19]的研究，统一折算为等标污染排放量；肉羊养殖过程中温室气体排放采用IPCC计算方法，肉羊养殖系统的温室气体排放包括间接排放和直接排放2部分，其中直接排放包括饲养环节排放(燃料燃烧和购入电力排放)、动物肠道排放和动物粪便管理排放，间接排放包括饲料粮种植与运输加工引起的排放。此外，为更好的区分出不同养殖方式等对肉羊温室气体排放造成的差异，本研究参考朱宁等[8]的方法，对养殖户肉羊养殖温室气体排放系数进行了修正，修正公式为：

$$F_{\text{site}}=F_{\text{default}}\times W_{\text{site}}^{0.75}/W_{\text{default}}^{0.75}$$

式中：F_{site}为折算后的温室气体排放系数；F_{default}为《省级温室气体清单编制指南》[20]中肉羊的温室气体排放系数；W_{site}为肉羊实际体重；W_{default}为肉羊参考体重。本研究参照谢鸿宇等[21]的研究统一折算成C排放。投入包括幼畜购进费、精饲料费、饲草费、劳动力投入和其他费用。精饲料费主要包括养殖户自产或购买的玉米、麸皮、油葵、荞麦、豆粕和配合饲料等费用。饲草费主要包括养殖户自产或购买的苜蓿、干草、青贮饲料、秸秆等。劳动力投入肉羊养殖过程中自有劳动力和雇工劳动力的工作总天数，并按8 h折算成标准工日。其他费用主要包括医疗防疫费、固定资产折旧费、饲盐费、草场建设维护费、死亡损失费及其他费用等。

2.3.2 核心解释变量

种养结合为养殖场户是否种养结合，是虚拟变量；如果养殖场户采用种养结合生产方式，则取值为1，否则为0。种养结合是畜禽养殖产生的粪便、有机物为种植业提供有机肥来源，同时种植业生产的农作物又能够给畜禽养殖提供食源的一种有机结合模式。可以看出，种养结合包含羊粪施用和饲草料种植2个环节，基于此，本研究将养殖户羊粪用作种养结合且饲草料来源于种养结合的定义为种养结合户，否则为非种养结合户。

2.3.3 控制变量

参照已有研究[3,18,22-23]，并结合肉羊养殖特点，本研究分别选取养殖户个人特征、肉羊养殖特征及

外部环境共3类13个变量作为控制变量。

户主年龄为户主当年的实际年龄。年龄越大思想可能越保守，对新事物的理解和接受能力越弱，风险偏好程度越低，进而不利于肉羊养殖环境技术效率的提升；但年龄越大肉羊养殖经验更为丰富，有利于提升肉羊养殖环境技术效率。因此，年龄对肉羊养殖环境技术效率的影响方向不确定。

户主文化程度为户主受教育年限。受教育程度是家庭决策者人力资本的重要体现，一般来说，受教育程度越高，学习能力越强，观念越先进，对先进养殖技术、新经营理念等接受和应用程度可能越高[24]，从而有利于养殖环境技术效率提升。

劳动人口数为家庭劳动力人口数量。种养结合属于劳动密集型的生产模式，因此养殖户家庭内劳动力禀赋越高，越有助于缓解家庭肉羊养殖过程中面临的劳动力供给约束，进而对环境技术效率提升起到积极作用。

养殖专业化程度为肉羊养殖收入在家庭总收入的占比。其值越大，家庭对肉羊养殖可能越重视，对新技术、新理念的接受和应用越快，养殖精细化程度可能越高，从而有助于环境技术效率提升。

养殖肉羊年限为截至当年养殖户肉羊养殖年限。养殖初期，养殖经验不足，对养殖技术、养殖经营理念的学习欲望较强，再加上“干中学”，因而可能对环境技术效率的提升有促进作用；但随着养殖年限的增加，养殖经营观念已经形成，可能思想趋于保守僵化，很难接受新事物，进而不利于环境技术效率提升[23]。因此，养殖年限对肉羊养殖环境技术效率的影响方向不确定。

养殖规模为养殖户肉羊实际养殖数量。规模效应理论认为，经营规模越大的农户采纳新技术的动力越强。具体到肉羊养殖户，养殖规模大小是否会影响环境技术效率以及作用方向还有待检验。

固定资产投资为养殖户固定资产投资额自然对数。生产性投资即养殖户对圈舍设施和养殖机械设施等方面的总投入，圈舍设施主要包括圈舍、青储窖、药浴池、食槽、盐槽等，养殖机械设施主要包括铡草机、饲料粉碎机、拖拉机等。养殖机械的投入，特别是铡草机、饲料粉碎机等机械的使用有助于养殖户提高饲草料的利用效率，标准化圈舍的修建也有利于减少羊只疫病。因此，生产性投资可能对环境技术效率提升具有积极作用。

耕地禀赋为养殖户种植耕地面积。养殖户耕地禀赋越高，可能越有利于其采用种养结合，但种养结合不仅局限于自种自养，也可与其他组织合作形成种养结合。因此，耕地禀赋对肉羊养殖环境技术性效率的影响并不确定。

是否参与合作社/协会为虚拟变量；如果养殖户参与合作社/协会等，则取值为1，否则为0。通常加入合作组织的养殖户在市场信息获取、技术培训、饲草料采购、肉羊销售等方面具有优势，有助于降低经营风险，从而有利于环境技术效率提升，但也有研究指出部分地区合作社未真正发挥作用，社员之间各自分散独立经营，合作社沦为“空壳社”[25]，因此，加入合作组织对环境技术效率的影响有待进一步探究。

技术培训为户主接受肉羊养殖技术培训次数。参加肉羊养殖技术培训有助于养殖户更好地了解和掌握肉羊养殖技术，从而将先进养殖技术应用于肉羊养殖实践，最终可能有利于环境技术效率提升。

养殖场与乡政府距离为养殖场与乡政府实际距离。在中国，地方政府通常为经济聚集中心。新经济地理学认为，经济聚集使距离聚集中心越近的农民越有机会获得更高的收入，带来劳动生产率的提升[26]，进而提升环境技术效率。

是否位于农区是虚拟变量；如果养殖场位于农区，则取值为1，否则为0。由于各地区在资源禀赋、气候条件等方面存在差异，因此有必要引入地区因素进行控制。

环境规制为养殖户认为当地政府对肉羊养殖的环境监管力度。一般来讲，养殖户认为政府的环境监管力度越大，则越会注重肉羊非期望产出的减排及处理，最终可能对环境技术效率起到提升作用。由于肉羊更多为散养，政府很少有针对肉羊的惩罚性政策，因此本研究参照已有研究[27]用养殖户认为政府对肉羊养殖的环境监管力度来代表政府规制强度。

2.3.4　工具变量

借鉴相关研究成果，本研究选择养殖户参与种养结合前（未参与养殖户直接回答）对种养结合认知情况作为工具变量[12,18]。判断养殖户对种养结合认知的问卷题项为“您在未采用种养结合模式之前，对种养结合模式的了解程度？”该变量采用李克特五点量表进行测量。具体变量描述性统计见表1。

表1 变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量名称 Variable	变量定义 Definition	均值 Mean		平均差 Mean deviation
		非种养结合 Non-breeding combination	种养结合 Combination of planting and breeding	
环境技术效率 Environmental technical efficiency	肉羊养殖环境技术效率	0.639	0.850	−0.211***
种养结合 Combination of planting and breeding	非种养结合模式=0，种养结合模式=1	—	—	—
户主年龄 Age of head of household	岁	54.434	51.564	2.870*
户主文化程度 Education level of the household head	小学以下=1，小学=2，初中=3，中专及高中=4，大专及以上=5	2.830	2.798	0.032
养殖专业化程度 Specialization degree of aquaculture	肉羊养殖收入占家庭总收入的比例，%	0.679	0.695	−0.016
养殖规模 Breeding scale	肉羊实际养殖数量，只	87.716	54.902	32.813*
劳动力人口数 Labor force population	家庭劳动力人口数量，人	2.264	2.410	−0.145
固定资产投资 Investment in fixed assets	固定资产投资额自然对数，万元	10.758	10.955	−0.198
耕地禀赋 Cultivated land endowment	种植耕地面积，0.067 hm^2	28.764	27.753	1.011
养殖肉羊年限 Years of raising mutton sheep	年	16.623	18.819	−2.197
技术培训 Technical training	户主接受肉羊养殖技术培训次数	1.283	1.027	0.256
是否参与合作社/协会 Whether participate in cooperatives/associations	否=0，是=1	0.264	0.298	−0.034
是否位于农区 Whether locate in rural area	否=0，是=1	0.434	0.564	−0.130*
养殖场与乡政府距离 Distance between the farm and the township government	0～5 km=1，>5～10 km=2，>10～15 km=3，>15～20 km=4，>20 km=5	2.509	3.011	−0.501**
环境规制 Environmental regulation	当地政府对肉羊养殖环境监管力度：非常弱=1，较弱=2，一般=3，较强=4，非常强=5	2.887	2.846	0.041
种养结合认知 Cultivation combined with cognition	非常弱=1，较弱=2，一般=3，较强=4，非常强=5	2.283	2.628	−0.345

注：环境技术效率利用MAXDEA 8软件计算。***、**、*分别表示1%、5%、10%水平上统计显著，下表同。

Note: The environmental technical efficiency was calculated by MAXDEA 8 software. ***, ** and * are statistically significant at the significance level of 1%, 5% and 10%, Same as below.

3 种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响

本研究采用MLE模型和最小二乘法就种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响进行估计，结果见表2。Wald检验结果（Prob＞chi2＝0.00）显示所有回归系数共同等于零的假设被拒绝。MLE模型估计结果显示：1）与非种养结合模式相比，种养结合生产方式对肉羊养殖环境技术效率有显著的正向影响，影响系数为0.45，此结论验证了假说1a。说明与非种养结合生产方式相比，种养结合生产方式可以提升肉羊养殖环境技术效率。究其原因：①由于种养结合可实现种地与养地结合，解决粪肥排放污染的同时化解农牧经营主体分离条件下粪肥还田成本问题；②种养结合可优化养殖户的资源配置；③种养结合在一定程度上解决了饲草料来源问题，降低了饲草料成本。2）参加培训次数、家庭劳动力人口及肉羊养殖规模均对肉羊养殖环境技术效率有显著的正向影响。表明技术培训次数的增加、家庭劳动力人口的增多及肉羊养殖规模的扩大均能够提升肉羊养殖环境技术效率。究其原因：①参加培训使得养殖户掌握先进技术，进而促进环境技术效率提升；②在当前肉羊养殖规模普遍较小的情况下，增加养殖规模会产生规模效应，进而促进肉羊养殖环境技术效率提升；③家庭劳动力人口较多的家庭劳动力较为充足，对市场信息搜集能力以及把握程度更强，在肉羊养殖等方面的经营意识和管理理念相对更强，在采用新技术、接受新信息上处于优势地位，并且肉羊养殖精细化程度会增加，进而影响肉羊养殖环境技术效率。

表2　种养结合对肉羊养殖环境技术效率影响的估计结果

Table 2　Results of effects of combination of planting and breeding on environmental technical efficiency of mutton sheep breeding

变量 Variable	处理效应模型① Treatment effect model		最小二乘法② Least square method
	选择方程 Selection equation	环境技术效率方程 Environmental technology efficiency equation	
种养结合 Combination of planting and breeding		0.452***（3.02）	0.218***（2.94）
是否位于农区 Whether locate in rural area	0.877***（3.27）	0.015（0.18）	0.066（0.83）
养殖肉羊年限 Years of raising mutton sheep	0.012（1.38）	0.004（1.49）	0.005*（1.92）
户主年龄 Age of head of household	−0.021*（−1.81）	−0.004（−1.09）	−0.005（−1.55）
劳动力人口数 Number of working population	0.107（1.01）	0.062**（2.10）	0.067**（2.27）
技术培训次数 Number of technical training	−0.250***（−2.60）	0.067**（2.32）	0.055*（1.92）
环境规制 Environmental regulation	−0.075（−0.91）	−0.012（−0.59）	−0.01（−0.48）
固定资产投资 Investment in fixed assets	0.156（1.56）	−0.047（−1.57）	−0.035（−1.19）
户主文化程度 Education level of the household head	−0.025（−0.21）	−0.029（−0.83）	−0.029（−0.84）
是否参与合作社/协会 Whether participate in cooperatives/associations	0.068（0.27）	−0.022（−0.32）	−0.018（−0.26）

表2(续)

变量 Variable	处理效应模型① Treatment effect model		最小二乘法② Least square method
	选择方程 Selection equation	环境技术效率方程 Environmental technology efficiency equation	
肉羊养殖规模 Mutton sheep farming scale	−0.001*(−1.69)	0.001***(4.24)	0.001***(3.89)
养殖专业化程度 Specialization degree of aquaculture	−0.238(−0.54)	−0.029(−0.22)	−0.055(−0.43)
养殖场与乡政府距离 Distance between the farm and the township government	0.234***(3.18)	−0.010(−0.43)	0.005(0.25)
耕地禀赋 Cultivated land endowment	0.000(0.09)	−0.001(−0.77)	−0.001(−0.74)
种养结合认知 Cultivation combined with cognition	0.257***(2.59)		
常数项 Cons	−1.189(−0.80)	0.979**(2.27)	1.039**(2.39)
λ	−0.139		
对数似然值 Log likelihood	−246.096		
$P>\chi^2$检验 Prob>chi2	0.000		

注:①括号中的数值为z值;②括号中的数值为t值。表3同。

Note: ① The values in parentheses are z-values; ② The values in parentheses are t-values. Same as Table 3.

不同程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率影响的估计结果见表3。Wald检验结果(Prob>chi2=0.00)显示所有的回归系数共同等于零的假设被拒绝。从环境技术效率估计方程看,λ_2和λ_3在1%水平上显著,表明种养结合程度与肉羊养殖环境技术效率之间存在内生关系;λ_2和λ_3显著为负,说明存在负的选择偏差,表明未观测到的促使养殖户选择不同种养结合程度的因素与肉羊养殖环境技术效率负相关[28]。因此,处理效应模型估计结果更为合理。处理效应模型估计结果显示:与非种养结合模式相比,较低程度种养结合以及较高程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率均有显著的正向影响,影响系数分别为0.38和0.66。此结论验证了假说1b。一方面说明与非种养结合模式相比,种养结合可以提升肉羊养殖环境技术效率;另一方面说明较高程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率的提升作用高于较低程度种养结合。

4 种养结合影响肉羊养殖环境技术效率的机制

种养结合对肉羊养殖环境技术效率影响机制的估计结果见表4。MLE模型估计结果显示,种养结合生产方式主要通过减少饲草料费用、增加出栏羊活重及降低碳排放来提升肉羊养殖环境技术效率。上述结论验证假说2。可以看出:首先,在饲草料投入方面,对于种养结合户来说,尽管也需要在饲料市场购买商品饲料,但农田种植的农作物及其产品也可以作为饲料使用,这在一定程度上会减少商品饲料的使用。肉羊粪污经过处理以后,可以资源化利用,转化为有机肥,这在一定程度上降低了农田化肥使用量和饲草料生产成本。其次,种养结合饲草料质量较高且养殖环境较好会增加肉羊产出;目前草场资源限制下,大多地区大力推广肉羊舍饲养殖方式,因此采用种养

表 3　不同程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率影响的估计结果

Table 3　Results of effects of different degree of combination of planting and breeding on environmental technical efficiency of mutton sheep breeding

变量 Variable	处理效应模型 Treatment effect model	最小二乘法 Least square method
较低程度种养结合 Low degree of combination of planting and breeding	0.377***（−4.62）	0.150**（2.09）
较高程度种养结合 High degree of combination of planting and breeding	0.660***（−6.08）	0.524***（5.53）
控制变量 Control variable	控制	控制
常数项 Cons	0.785*（1.90）	0.927**（2.23）
替代弹性 Lnsigma	−1.269***（−7.33）	
λ_2	−0.277***（−5.01）	
λ_3	−0.137**（−2.23）	
对数似然值 Log likelihood	−319.068	
$P>\chi^2$检验值 Prob>chi2	0.000	

表 4　种养结合对肉羊养殖环境技术效率影响机制的估计结果

Table 4　Results of influence mechanism of combination of planting and breeding on environmental technical efficiency of mutton sheep breeding

假设 Hypothesis	变量 Variable	饲草料费用 Forage cost	劳动力投入 Labor input	出栏羊活重 Live weight of sheep for slaughter	面源污染 Non-point source pollution	碳排放 Carbon emission
内生 MLE Endogenous MLE	种养结合	−104.156*** （−3.79）	0.027 （0.06）	11.060*** （4.55）	−2.332 （−1.30）	−24.090*** （−7.05）
	控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
	常数项	37.567 （0.51）	2.350*** （3.40）	37.461*** （4.67）	5.200** （2.38）	45.465*** （3.28）
	λ	45.485	0.010	−6.117	−0.560	2.357***
	对数似然值	−1470.176	−362.833	−920.694	−108.353	−1039.435
	$P>\chi^2$ 检验值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
外生 OLS Exogenous OLS	种养结合	−28.008** （−2.34）	0.044 （0.37）	0.699 （0.57）	−3.275*** （−8.85）	−4.159** （−2.04）
	控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
	常数项	18.043 （0.26）	2.345*** （3.33）	40.117*** （5.57）	5.442** （2.50）	40.355*** （3.36）

注：括号中的数值为z值，表5同。

Note: Values in parentheses are z-values, Same as in Table 5.

结合实现废弃物污染的清理与资源化利用能为肉羊养殖营造良好圈舍环境，进而影响肉羊生产性能，改变养殖收益。最后，种养结合户通过改善饲草料配比、饲养方式等，对肉羊养殖产生的碳排放产生影响。

5 稳健性检验

为检验估计结果的稳健性，采用更换样本的方法重新估计种养结合对环境技术效率的影响（表5）。从模型估计结果可知：1）高龄组，与非种养结合生产方式相比，种养结合生产方式对肉羊养殖环境技术效率有显著的正向影响。2）牧区半牧区组，与非种养结合相比，种养结合生产方式对肉羊养殖环境技术效率有显著的正向影响。总体看，无论是高龄组还是牧区半牧区组关键解释变量的估计结果与全部样本一致，这说明前述实证结果较为稳健。

表5 种养结合对高龄组、牧区半牧区组肉羊养殖环境技术效率影响的估计结果

Table 5 Results of effects of combination of planting and breeding on environmental technical efficiency of mutton sheep breeding in senior age group and semi-pastoral group

变量 Variable	高龄组 Senior age group	牧区半牧区组 Semi-pastoral group
种养结合 Combination of planting and breeding	0.483**（2.31）	0.561***（2.87）
控制变量 Control variable	控制	控制
常数项 Cons	1.235***（2.60）	1.080*（1.88）
λ	−0.192	−0.115
对数似然值 Loglikelihood	−105.975	−83.939
$P>\chi^2$检验值 Prob>chi2	0.006	0.000

6 结论与政策建议

本研究采用Super-SBM模型测算了肉羊养殖环境技术效率，并基于处理效应模型探究了种养结合对肉羊养殖环境技术效率的影响及影响机制，得出以下结论：

1）种养结合户肉羊养殖环境技术效率均值高于非种养结合户肉羊养殖环境技术效率均值。

2）与非种养结合生产方式相比，种养结合能够提高肉羊养殖环境技术效率；且较高程度种养结合对肉羊养殖环境技术效率的提升作用强于较低程度种养结合的作用。

3）种养结合通过降低饲草料投入、提升肉羊出栏活重和减少碳排放来提升肉羊养殖环境技术效率。

基于以上结论，本研究提出以下政策建议：

1）加强种养结合技术研发及推广。为促进种养结合向高程度演化，应积极探索肉羊养殖的工艺模式及其配套设备，降低较高程度种养结合的成本。深入研究相关领域理论知识和实践技巧，结合当地实际情况，积极探索舍饲养羊的技术模式。加快粪污资源化利用技术的研发进程，开发操作简便、便携性强、工作稳定的粪污治理机械。此外，要建立完善的农技推广体系，采用实用设施设备观摩、企业参观和专家入户指导等方式推广种养结合模式。

2）建立养殖法规政策的绿色导向机制，提高区域种养结合水平。对于耕地配套条件较好的养殖场户，政府应对其进行一定的种养结合补贴，如粪污处理设施补贴、饲草料种植补贴等；对于耕地配套条件较差的养殖场户，应重点在土地流转给予政策支持或建立大型的有机肥厂与其配套，在空间布局上尽可能将养殖场、相关种植大户和粪污资源化利用企业结合起来，打通种养种养结合堵点，提高养殖户种养结合效率。在全国各地政府和养殖场户之间搭建公共补贴政策信息发布平台，力争实现

补贴政策公开化和透明化，提高养殖场户对种养结合补贴政策的了解程度。

参考文献　References

[1] 高思涵，吴海涛．典型家庭农场组织化程度对生产效率的影响分析[J]．农业经济问题，2021(3)：88-99
Gao S H, Wu H T. Analysis on the influence of organizational degree to production efficiency in typical family farm [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2021(3): 88-99 (in Chinese)

[2] 葛鹏飞，王颂吉，黄秀路．中国农业绿色全要素生产率测算[J]．中国人口·资源与环境，2018，28(5)：66-74
Ge P F, Wang S J, Huang X L. Measurement for China's agricultural green TFP [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(5): 66-74 (in Chinese)

[3] 李谷成，冯中朝，占绍文．家庭禀赋对农户家庭经营技术效率的影响冲击：基于湖北省农户的随机前沿生产函数实证[J]．统计研究，2008，25(1)：35-42
Li G C, Feng Z C, Zhan S W. An empirical analysis about the effect of household endowments on the technical efficiency of farmer's household management: Evidence from the farmers of Hubei Province [J]. *Statistical Research*, 2008, 25(1): 35-42 (in Chinese)

[4] 易青，李秉龙，耿宁．基于环境修正的中国畜牧业全要素生产率分析[J]．中国人口·资源与环境，2014，24(S3)：121-125
Yi Q, Li B L, Geng N. Environmentally-adjusted analysis of total factor productivity of China's animal husbandry [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(S3): 121-125 (in Chinese)

[5] 崔姹，王明利，石自忠．基于温室气体排放约束下的我国草食畜牧业全要素生产率分析[J]．农业技术经济，2018(3)：66-78
Cui C, Wang M L, Shi Z Z. Effect of greenhouse gas emissions on total factor productivity of herbivorous animal husbandry in China[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(3): 66-78 (in Chinese)

[6] 王善高，田旭．种养结合能提高小规模生猪养殖的环境效率吗?：基于江苏省生猪养殖户的分析[J]．中国农业大学学报，2021，26(2)：199-210
Wang S G, Tian X. Can the integrated crop-livestock production improve the environmental efficiency of small-scale hog farming? Analysis of hog farmers in Jiangsu Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(2): 199-210 (in Chinese)

[7] 高海秀，王明利，石自忠．我国肉牛养殖环境效率及影响因素分析[J]．中国农业资源与区划，2021，42(1)：153-159
Gao H X, Wang M L, Shi Z Z. Analysis on eco-efficiency and influencing factors of beef cattle in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(1): 153-159 (in Chinese)

[8] 朱宁，秦富．畜禽废弃物处理对规模养殖环境效率的影响：基于蛋鸡粪便处理的视角[J]．中国环境科学，2015，35(6)：1901-1910
Zhu N, Qin F. Influence of livestock and poultry's waste disposal on the environmental efficiency in scale breeding: From the perspective of layers' fecal disposal[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(6): 1901-1910 (in Chinese)

[9] 李杰，胡向东，王玉斌．生猪养殖户养殖效率分析：基于4省277户养殖户的调研[J]．农业技术经济，2019(8)：29-39
Li J, Hu X D, Wang Y B. Analysis of pig breeding efficiency and its influence factors: A survey of 277 farmers in four provinces in China[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(8): 29-39 (in Chinese)

[10] 杨皓天，马骥．环境规制下养殖户的环境投入行为研究：基于双栏模型的实证分析[J]．中国农业资源与区划，2020，41(3)：94-102
Yang H T, Ma J. The research of farmers' environmental investment under environmental regulation: Empirical analysis based on the double column model [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(3): 94-102 (in Chinese)

[11] 邹洁，项朝阳．中国大陆畜牧业环境效率测算及影响因素研究[J]．环境污染与防治，2016，38(1)：90-96
Zou J, Xiang C Y. Research on the livestock environmental efficiency in mainland China and its influencing factors[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(1): 90-96 (in Chinese)

[12] 陈雪婷，黄炜虹，齐振宏，冯中朝．生态种养模式认知、采纳强度与收入效应：以长江中下游地区稻虾共作模式为例[J]．中国农村经济，2020(10)：71-90
Chen X T, Huang W H, Qi Z H, Feng Z C. Farmers' cognition, adoption intensity and income effect of ecological breeding mode: A case study of rice-shrimp co-cultivation mode in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Rural Economy*, 2020 (10): 71-90 (in Chinese)

[13] 钟珍梅，黄勤楼，翁伯琦，黄秀声，冯德庆，陈钟佃．以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析[J]．农业工程学报，2012，28(14)：196-200
Zhong Z M, Huang Q L, Weng B Q, Huang X S, Feng D Q, Chen Z D. Energy analysis on planting-breeding circulating agriculture ecosystem linked by biogas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 196-200 (in Chinese)

[14] 朱冠楠，李群．明清时期太湖地区的生态养殖系统及其价值研究[J]．中国农史，2014，33(2)：133-141，77
Zhu G N, Li Q. Ecological breeding system and its value of Taihu Lake area in Ming and Qing dynasties [J]. *Agricultural History of China*, 2014, 33(2): 133-141, 77 (in Chinese)

[15] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509

[16] 胡达沙，李杨．环境效率评价及其影响因素的区域差异[J]．财经科学，2012(4)：116-124
Hu D S, Li Y. Assessment of environmental efficiency and regional distinction of its influencing factors[J]. *Finance & Economics*, 2012(4): 116-124 (in Chinese)

[17] 陈强．高级计量经济学及Stata应用[M]．2版．北京：高等教育出版社，2014：570-574
Chen Q. *Advanced Econometrics and Stata Application* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 570-574 (in Chinese)

[18] 丁存振，肖海峰．交易特性、农户产业组织模式选择与增收效应：基于多元Logit模型和MTE模型分析[J]．南京农业大学学报：社会科学版，2019，19(5)：130-142，159
Ding C Z, Xiao H F. Transaction characteristics, farmers' industrial organization model selection and income growth: An analysis based on multivariate logit model and MTE model [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2019, 19(5): 130-142, 159 (in Chinese)

[19] 潘丹，应瑞瑶．资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长研究[J]．资源科学，2013，35(7)：1329-1338
Pan D, Ying R Y. Agricultural total factor productivity growth in China under the binding of resource and environment [J]. *Resources Science*, 2013, 35(7): 1329-1338 (in Chinese)

[20] 国家发改委气候变化司．省级温室气体清单编制指南：试行[R]．北京：国家发改委，2011

Climate Change Division of National Development and Reform Commission. Guidelines for the provincial inventory of greenhouse gas: Trial[R]. Beijing: National Development and Reform commission, 2011

[21] 谢鸿宇，陈贤生，杨木壮，招华庆，赵美婵. 中国单位畜牧产品生态足迹分析[J]. 生态学报，2009，29(6)：3264-3270

Xie H Y, Chen X S, Yang M Z, Zhao H Q, Zhao M C. The ecological footprint analysis of 1 kg livestock product of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3264-3270 (in Chinese)

[22] 何忠伟，韩啸，余洁，刘芳. 我国奶牛养殖户生产技术效率及影响因素分析：基于奶农微观层面[J]. 农业技术经济，2014(9)：46-51

He Z W, Han X, Yu J, Liu F. Analysis on production technical efficiency and influencing factors of dairy farmers in China: Based on micro-level of dairy farmers[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2014(9): 46-51 (in Chinese)

[23] 刘春鹏，肖海峰. 禁牧政策、养殖规模与技术效率：基于五省区绒毛用羊养殖户的微观研究[J]. 农业现代化研究，2019，40(1)：138-144

Liu C P, Xiao H F. Grazing ban policy, breeding scale and technical efficiency: A case study of sheep farmers from five provinces [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40 (1) : 138-144 (in Chinese)

[24] 李后建. 农户对循环农业技术采纳意愿的影响因素实证分析[J]. 中国农村观察，2012(2)：28-36，66

Li H J. Empirical analysis of influencing factors of farmers' willingness to adopt circular agricultural technology[J]. *China Rural Survey*, 2012(2): 28-36, 66 (in Chinese)

[25] 潘劲. 中国农民专业合作社：数据背后的解读[J]. 中国农村观察，2011(6)：2-11，94

Pan J. Specialized farmers' cooperatives in China: The interpretation of the data of their development[J]. *China Rural Survey*, 2011(6): 2-11, 94 (in Chinese)

[26] 伍骏骞，阮建青，徐广彤. 经济集聚、经济距离与农民增收：直接影响与空间溢出效应[J]. 经济学：季刊. 2016，16(1)：297-320

Wu J Q, Ruan J Q, Xu G T. Economies agglomeration, economies distance, and farmer's income growth: A study on direct and spillover effects[J]. *China Economic: Quarterly*, 2016, 16(1): 297-320 (in Chinese)

[27] 刘琼. 我国肉羊养殖户粪污资源化利用行为及经济效应研究[D]. 北京：中国农业大学，2022

Liu Q. Study on excrement resource utilization behavior and economic effect of mutton sheep farmers in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022 (in Chinese)

[28] Deb P, Trivedi P K. Maximum simulated likelihood estimation of a negative binomial regression model with multinomial endogenous treatment [J]. *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*, 2006, 6(2): 246-255

责任编辑：刘迎春

第一作者简介：王如玉，1990年生于天津，2023年6月在中国农业大学获得博士学位，自2023年7月就职于天津市农业科学院农村经济与区划研究所，主要研究领域包括农产品市场与政策、农业资源与环境、农产品贸易等。在校期间多次获得学业一等奖学金和三好学生荣誉称号，并获得2023届夏季优秀研究生毕业生（校级）；参与“生猪等畜禽生产统计监测及预警研究项目”和“国家绒毛用羊产业技术体系产业经济研究项目”。参编《2021中国绒毛用羊产业发展与政策研究报告》《中国绒毛用羊产业经济研究（第八辑）》《2021年畜牧业发展形势及2022年展望报告》《2022年畜牧业发展形势及2023年展望报告》等著作。以第一作者在《干旱区资源与环境》、《中国农业大学学报》、《世界农业》等期刊发表8篇文章。

通讯作者简介：肖海峰，1964年生于内蒙古，1995年10月在德国Hohenheim大学获博士学位。2002年起为中国农业大学经济管理学院教授、博士生导师，主要研究方向为畜牧业经济、农产品市场与政策。先后主持完成（包括正在进行）国家自然科学基金项目、农业部软科学项目、农业部、财政部等部委项目、中德合作、FAO项目等40余项。出版著作及教材近20部，在《中国农村经济》、《农业经济问题》等杂志上发表论文200余篇。多项政策建议获得党和国家领导人批示。获得北京市“四个一批”人才、全国农业推广硕士优秀论文指导教师、中国农业大学十大优秀博士论文指导教师等奖励。自2011年起，被农业部、财政部聘为国家绒毛用羊产业技术体系产业经济研究室主任、产业经济岗位专家。从2012年开始，被农业农村部聘为肉羊产业监测与预警首席专家。