

# 西北河西灌溉区春玉米-绿肥农田生态系统 服务功能价值评估\*

任静<sup>1</sup>, 李福夺<sup>1</sup>, 尹昌斌<sup>1†</sup>, 张久东<sup>2</sup>, 包兴国<sup>2</sup>, 车宗贤<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 甘肃省农业科学院 土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 农田种植绿肥是提高西北河西灌溉区耕地质量的重要措施之一. 本文选取西北河西灌溉区主推绿肥品种毛叶苕子和针叶豌豆, 从农产品供给、土壤养分累积、水分涵养、土壤保持以及气体调节五类服务功能, 构建春玉米-绿肥农田生态系统服务功能价值评估方法体系, 确定春玉米间作不同绿肥农田系统的生态价值. 研究显示: 春玉米间作绿肥农田生态系统服务功能价值中, 农产品供给价值和气体调节价值对总价值的贡献率较大, 分别在39%~54%之间和30%~39%之间; 与单作春玉米相比, 春玉米间作毛叶苕子和针叶豌豆农田系统生态价值分别增长19.37%和43.74%, 约为初级农产品生产价值(直接经济效益)的1.8~2.6倍, 是总投入成本的4.8倍左右. 研究结果可为西北地区农田种植绿肥制定生态补偿政策提供理论和数据依据.

**关键词:** 西北灌溉农业区; 绿肥; 生态价值评估; 生态补偿; 农田生态系统

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2021.01.29.0004

**中图分类号:** X826; X828 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)01-0059-08

**引文格式:** 任静, 李福夺, 尹昌斌, 张久东, 包兴国, 车宗贤. 西北河西灌溉区春玉米-绿肥农田生态系统服务功能价值评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 59-66.

**英文引文格式:** REN Jing, LI Fuduo, YIN Changbin, ZHANG Jiudong, BAO Xingguo, CHE Zongxian. Evaluation of the farmland ecosystem service function of spring maize-green manure in the northwest irrigated agricultural area[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 59-66.

## Evaluation of the Farmland Ecosystem Service Function of Spring Maize-Green Manure in the Northwest Irrigated Agricultural Area

REN Jing<sup>1</sup>, LI Fuduo<sup>1</sup>, YIN Changbin<sup>1</sup>, ZHANG Jiudong<sup>2</sup>, BAO Xingguo<sup>2</sup>, CHE Zongxian<sup>2</sup>

(1. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Planting green manure in farmland is one of the important measures to improve the quality of cultivated land in Hexi irrigation district in Northwest China. This paper selects the main green manure varieties: vicia villosa roth and needle leaf pea in the Hexi irrigation district, and builds a spring maize-green manure farmland ecosystem service function value evaluation method, from the five service functions of agricultural product supply, soil nutrient accumulation, water conservation, soil conservation and gas regulation, to determine the ecological value of spring maize intercropping with different green manure farmland systems. Result shows that among the service function value of the spring maize intercropping green manure farmland ecosystem, the supply value of agricultural products and the gas regulation value have a greater contribution rate to the total value, ranging from 39% to 54% and 30% to 39%, respectively. Compared with single-cropping spring maize, the ecological value of spring maize intercropping vicia villosa roth and needle leaf pea farmland system increased by 19.37% and 43.74%, respectively, which is about 1.8~2.6 times the value of primary agricultural products(direct economic benefits), and is about 4.8 times the total input cost. The research results provide theoretical and data supports for formulating ecological compensation policies for planting green manure in farmland in Northwest China.

\* 收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(G202101-53); 现代农业产业技术体系建设专项资金(绿肥, CARS-22).

作者简介: 任静(1984-), 女, 博士, 副研究员, 从事生态补偿与价值评估的研究, E-mail: renjing@caas.cn.

† 通讯作者: 尹昌斌(1968-), 男, 博士, 研究员, 从事资源利用与管理的研究, E-mail: yinchangbin@caas.cn.

**Key words:** northwest irrigated agricultural area; green manure; ecological value assessment; ecological compensation; farmland ecosystem

## 0 引言

西北河西灌溉区是我国重要的春玉米制种和生产基地,但在玉米生产过程中,长期存在施肥量过大、连作病虫害严重、耕地质量下降等一系列问题<sup>[1]</sup>,对我国西北灌溉地区玉米产业发展、玉米田生态环境以及农民的经济利益构成了严重威胁.因此,玉米田种植绿肥成为解决这些问题的关键措施之一.玉米田种植绿肥不仅能够增加玉米产量、减少化肥施用量,提高耕地质量,而且还具备调节大气、涵养水源和防风固沙等生态功能.由此,如何综合全面地评估玉米田引入绿肥生态系统服务功能价值成为当前研究的重点.因此,本文选取西北河西灌溉区玉米田主推绿肥品种毛叶苕子和针叶豌豆,以春玉米间作绿肥农田生态系统为研究对象,从农产品供给功能、土壤养分累积功能、水分涵养功能、土壤保持功能以及气体调节功能五方面,构建春玉米-绿肥农田生态系统服务功能价值评估方法体系,确定春玉米间作不同绿肥农田系统的生态价值,并与春玉米单作农田生态系统进行比较对照,以便全面准确地分析农田引入绿肥带来的综合价值.同时,该研究也可以为西北河西灌溉区制定农田种植绿肥的生态补偿政策和激励制度提供理论和数据依据.

## 1 研究方法

春玉米间作绿肥的生产方式是西北灌溉农业区重要生产方式之一,该生产方式既能保证春玉米产量,又能提高水肥热利用效率,为春玉米生产提供更多的养分.与春玉米单作相比,该生产方式不仅能节肥约450元/亩以上,更能在春玉米产量、土壤养分状况、温室气体排放与气体调节以及水土保持等方面影响玉米农田生态系统.因此,本研究以甘肃省河西灌溉区武威凉州区和张掖山丹县春玉米种植区为研究区域,在突出绿肥引入春玉米农田系统所产生的经济、生态效益的原则下,选取春玉米-毛叶苕子和春玉米-针叶豌豆两种农田生态系统的农产品供给、气体调节、土壤养分累积、水分涵养和土壤保持五项服务功能作为评估对象,采用市场替代法、影子价格法和机会成本法等生态经济学方法,建立春玉米-绿肥农田生态服务功能价值评估体系.

### 1.1 农产品供给价值

农产品供给服务是农田生态系统对人类福利最重要的贡献<sup>[2-3]</sup>.农产品供给价值是指一个种植周期内(1年),春玉米-绿肥的总产出减去总投入的值,包括玉米、玉米秸秆、绿肥籽粒和绿肥干草价值.在西北灌溉农业区,春玉米-绿肥的种植模式主要包括春玉米-毛叶苕子和春玉米-针叶豌豆两种种植模式.由于春玉米-绿肥农田生态系统产出和投入所涉及参数均可通过实地调研获得市场价格,因此该农田生态系统农产品供给价值采用市场价值法进行估算.具体计算公式如下:

$$V_{vp} = Q_c \times P_c - \sum M_i \times V_i - C_l \quad (1)$$

春玉米-针叶豌豆种植模式的农产品供给价值:

$$V_{pp} = Q_c \times P_c + Q_p \times P_p + Q_{ph} \times P_{ph} - \sum M_i \times V_i - C_l \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $V_{vp}$ 为春玉米-毛叶苕子种植模式下农产品供给价值(元/hm<sup>2</sup>); $V_{pp}$ 为春玉米-针叶豌豆种植模式下农产品供给价值(元/hm<sup>2</sup>); $Q_c$ 为玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>); $P_c$ 为玉米市场价格(元/kg); $Q_p$ 为针叶豌豆籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>); $P_p$ 为针叶豌豆籽粒价格(元/kg); $Q_{ph}$ 为针叶豌豆干草产量(kg/hm<sup>2</sup>); $P_{ph}$ 为针叶豌豆干草价格(元/kg); $M_i$ 为投入的物质资料(种子、农机、化肥和农药); $V_i$ 为投入物质资料(种子、农机、化肥和农药)的市场价格; $C_l$ 为单位面积人工劳动价格(元/hm<sup>2</sup>).公式(1)和公式(2)主要参数取值通过实地调研所得.

### 1.2 土壤有机质累积价值

绿肥是重要的有机肥源<sup>[4]</sup>,种植绿肥可以显著提高土壤有机质含量,促进土壤有益微生物生长,从而有利于保持土壤肥力<sup>[5]</sup>.因此,在一个种植周期内,春玉米间作绿肥的土壤有机质(soil organic matter)累积变化价值根据表层土壤有机质多年平均含量<sup>[6]</sup>进行计算,计算公式如下:

$$V_{som} = S \times (SOM_a - SOM_b) \times h \times \rho \times 0.58 \times p_{som(c)} \quad (3)$$

式中: $V_{som}$ 为土壤有机质累积价值(元/hm<sup>2</sup>); $S$ 为农田面积(hm<sup>2</sup>); $SOM_a$ 和 $SOM_b$ 为绿肥种植后和种植前土壤有机质含量(g/kg); $h$ 为土壤厚度(m),取0.20 m(武威试验站提供); $\rho$ 为土壤容重(kg/m<sup>3</sup>),试验区农田土壤

容重为 $1\ 330\ \text{kg}/\text{m}^3$  (武威试验站提供);  $0.58$ 为有机质换算为有机碳的系数<sup>[6]</sup>;  $p_{\text{som}(c)}$ 为以纯碳量计量的有机质肥料的市场价格,取 $1.47$ <sup>[7]</sup>元·kg/C.

### 1.3 土壤营养物质循环价值

绿肥通过吸收土壤中的营养物质加强农田生态系统中的土壤养分循环,防止土壤养分淋溶出土壤层<sup>[8]</sup>.在西北农业灌溉区,春种毛叶苕子和针叶豌豆有助于提高氮、磷、钾等土壤养分,特别是在绿肥生长过程中,不断通过共生根瘤菌的生物固氮作用为自身生长与土壤培肥提供所需的氮素<sup>[9-10]</sup>.因此,根据武威试验站专家意见,本研究只选取耕作层的碱解氮、有效磷和速效钾累积量来评价毛叶苕子和针叶豌豆-春玉米农田生态系统的土壤养分累积功能.由于土壤养分的价格无法通过市场获得,所以采用影子价格法,根据复合肥的平均价格,复合肥的含量以及成分配比,推算出氮、磷、钾的平均价格.土壤营养物质循环价值计算公式如下:

$$Q_{ji} = h \times \rho \times D_{ji} \quad (4)$$

$$V_{ji} = Q_{ji} \times P_i \quad (5)$$

$$V_{sn} = S \times \sum_{i=1, j=1}^3 V_{ji} \quad (6)$$

式中:  $V_{sn}$ 为土壤养分累积总价值(元/hm<sup>2</sup>);  $D_{ji}$ 为第 $j$ 种农田种植模式第 $i$ 类土壤养分的含量,包括土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量(g/kg),  $i=1, 2, 3$ ;  $V_{ji}$ 为第 $j$ 种农田种植模式第 $i$ 类土壤养分的价值(元/hm<sup>2</sup>);  $Q_{ji}$ 为第 $j$ 种农田种植模式第 $i$ 类土壤养分的累积量(kg/hm<sup>2</sup>);  $P_i$ 为碱解氮、有效磷、速效钾各自对应的肥料价格(元/kg),根据武威试验站和市场调研,尿素(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)、磷酸氢二铵((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)、氯化钾(KCl)的平均价格分别为2 000元/t、3 200元/t、1 800元/t,那么氮、磷、钾的价格分别为4.3元/kg、5.3元/kg、3.5元/kg.

### 1.4 土壤保持价值

绿肥在防治农田生态系统土壤侵蚀方面起着非常重要的作用<sup>[11]</sup>,春玉米间作绿肥可以有效减少农田裸露面积,大幅减低暴风雨对耕地的侵蚀,减少水土流失面积.由于土壤侵蚀使大量表层土壤的营养物质流失,造成土地废弃,并致使泥沙淤积<sup>[12]</sup>,因此春玉米间作绿肥农田生态系统的土壤保持价值拟从保护土壤肥力、减少土地废弃以及减轻泥沙淤积三方面进行展开.土壤保持价值的计算公式如下:

土壤保持量的计算公式:

$$Q_{sc} = S(K_{pj} - K_{rj}) \quad (7)$$

式中:  $Q_{sc}$ 为土壤保持量(t/hm<sup>2</sup>);  $K_{pj}$ 为第 $j$ 种农田种植模式的潜在土壤侵蚀模数(t/hm<sup>2</sup>);  $K_{rj}$ 为第 $j$ 种农田种植模式的实际土壤侵蚀模数(t/hm<sup>2</sup>).这里我们采用农田无作物裸露地的潜在土壤侵蚀模数与有作物覆盖的实际土壤侵蚀模数表示土壤保持总量.根据研究<sup>[13-14]</sup>,甘肃地区耕地年潜在侵蚀模数为75 t/hm<sup>2</sup>,单作春玉米的实际侵蚀模数为70.79 t/hm<sup>2</sup>,玉米间作毛叶苕子的实际侵蚀模数平均为27.85 t/hm<sup>2</sup>.但由于绿肥降低耕地土壤侵蚀的能力大体与绿肥地上生物量成正比<sup>[8]</sup>,根据武威试验站提供的数据,春玉米间作毛叶苕子产生的生物量是针叶豌豆的1.5倍,所以由此得出:玉米间作针叶豌豆的实际侵蚀模数为41.78 t/hm<sup>2</sup>.

保护土壤肥力价值计算公式:

$$V_{sc1} = Q_{sc} \times \sum_{i=1,2,3,4; j=1,2,3} Q_{ij} P_i \quad (8)$$

式中:  $V_{sc1}$ 为保护土壤肥力价值(元/hm<sup>2</sup>);  $Q_{ij}$ 为第 $j$ 种农田种植模式第 $i$ 类土壤养分的含量(g/kg),包括碱解氮、有效磷、速效钾、有机质四种土壤养分;  $P_i$ 为第 $i$ 类土壤养分对应的肥料价格(元/kg).

减少土地废弃价值计算公式:

$$V_{sc2} = Q_{sc} / (\rho \times h) \times P_j \quad (9)$$

式中:  $V_{sc2}$ 为减少土地废弃价值(元/hm<sup>2</sup>);  $P_j$ 为第 $j$ 种农田种植模式耕地的单位面积农业产值.

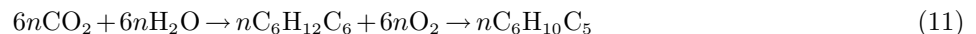
减少泥沙淤积价值计算公式:

$$V_{sc3} = Q_{sc} \times 24\% \times P_w \quad (10)$$

式中:  $V_{sc3}$  为减少泥沙淤积价值(元/hm<sup>2</sup>);  $P_w$  为水库库容建造成本8.22元/t, 1993—1999年《中国水利年鉴》显示水库库容平均造价是2.17元/t, 2012年国家统计局公布的原材料、燃料、动力类价格指数为3.725, 则2012年单位库容造价为8.08元/t, 再根据2017年和2018年的价格指数, 得出2017年和2018年的平均水库库容造价为8.22元/t. 24%为土壤侵蚀流失的泥沙淤积于水库、江河和湖泊的比例<sup>[12]</sup>.

### 1.5 气体调节价值

春玉米-绿肥农田生态系统的气体调节功能主要通过固碳释氧和温室气体排放等途径发挥出来的. 春玉米-绿肥的种植模式由于地上部分生物量的增加, 一方面可以提高农田的固碳释氧量, 另一方面, 农田种植绿肥也会增加一部分温室气体的排放量. 本研究中, 通过计算玉米成熟期和绿肥盛花期的干物质质量, 利用光合作用方程, 得出3种植植模式的气体调节价值. 根据武威试验站提供的数据, 春玉米成熟期干物质产量为15 000 kg/hm<sup>2</sup>, 毛叶苕子盛花期干物质产量为4 500 kg/hm<sup>2</sup>, 针叶豌豆盛花期干物质产量为3 000 kg/hm<sup>2</sup>.



根据光合作用方程(式(11)), 得出植物体每生产1 kg干物质质量, 便可以释放1.19 (192/162) kg O<sub>2</sub>, 固定1.63 (264/162) kg CO<sub>2</sub>, 由此可以计算出农田生态系统中固碳量、释氧量以及价值:

$$Q_{\text{O}_2} = (Q_{cd} + Q_{gd}) \times 1.19 \quad (12)$$

$$Q_{\text{CO}_2} = (Q_{cd} + Q_{gd}) \times 1.63 \quad (13)$$

$$V_{\text{O}_2} = Q_{\text{O}_2} \times C_{\text{O}_2} \quad (14)$$

$$V_{\text{CO}_2} = Q_{\text{CO}_2} \times C_{\text{CO}_2} \quad (15)$$

式中:  $Q_{\text{O}_2}$  为农田O<sub>2</sub>的释放量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Q_{\text{CO}_2}$  为农田CO<sub>2</sub>的固定量(kg/hm<sup>2</sup>);  $V_{\text{O}_2}$  为释放O<sub>2</sub>的价值(元/hm<sup>2</sup>);  $V_{\text{CO}_2}$  为固定CO<sub>2</sub>的价值(元/hm<sup>2</sup>);  $Q_{cd}$  为玉米成熟期干物质质量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Q_{gd}$  为绿肥盛花期干物质质量(kg/hm<sup>2</sup>);  $C_{\text{O}_2}$  为释放O<sub>2</sub>需要的造林成本, 取值0.38元/kg, 选取目前较多采用(0.35元/kg)和工业制氧的成本(0.40元/kg)二者的平均值;  $C_{\text{CO}_2}$  为固定CO<sub>2</sub>需要的造林成本, 取值0.26元/kg<sup>[7]</sup>.

农田土壤是温室气体N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>的重要排放源, 其排放分别占全球温室气体N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>总排放的60%、50%和10%<sup>[15]</sup>. 本研究中, 根据增温潜势(Global Warming Potentials, GWP)来计算温室气体的价值, 即将春玉米农田产生的N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>等温室气体排放量换算成等温室效应的CO<sub>2</sub>量, 然后运用固碳造林成本法, 对春玉米农田生态系统温室气体排放进行价值评估. 根据研究<sup>[16]</sup>, 西北灌溉农业区单作玉米N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>的排放量分别为730 kg N<sub>2</sub>O-C/hm<sup>2</sup>、-0.093 kg CH<sub>4</sub>-C/hm<sup>2</sup>、560 kg CO<sub>2</sub>/hm<sup>2</sup>; 春玉米间作毛叶苕子和针叶豌豆的N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>的排放量无显著差异, 本研究视为相同, 为1 056.56 kg N<sub>2</sub>O-C/hm<sup>2</sup>、20.775 kg CH<sub>4</sub>-C/hm<sup>2</sup>、560.852 kg CO<sub>2</sub>/hm<sup>2</sup>.

计算公式如下:

$$Q_{\text{N}_2\text{O}(\text{C})+\text{CH}_4(\text{C})} = 0.27 \times \kappa \times E_n = 0.27 \times (24.5 \times Q_{\text{CH}_4} + 320 \times Q_{\text{N}_2\text{O}}) \quad (16)$$

$$V_{\text{grg}} = C_{\text{CO}_2} \times (Q_{\text{N}_2\text{O}(\text{C})+\text{CH}_4(\text{C})} + Q_{\text{CO}_2}) \quad (17)$$

式中:  $Q_{\text{N}_2\text{O}(\text{C})+\text{CH}_4(\text{C})}$  为根据增温潜势将CH<sub>4</sub>或者N<sub>2</sub>O换算为纯碳的量(kg(C)/hm<sup>2</sup>);  $\kappa$  为CH<sub>4</sub>或者N<sub>2</sub>O换算为CO<sub>2</sub>的GWP值(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的GWP值分别为24.5和320)<sup>[16]</sup>;  $E_n$  为农田CH<sub>4</sub>或者N<sub>2</sub>O的排放量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Q_{\text{CH}_4}$  为农田CH<sub>4</sub>的排放量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Q_{\text{N}_2\text{O}}$  为农田N<sub>2</sub>O的排放量(kg/hm<sup>2</sup>); 0.27为CO<sub>2</sub>中的含碳量<sup>[16]</sup>.

### 1.6 水涵养价值

研究<sup>[11]</sup>表明玉米田通过绿肥翻压, 改进土壤孔隙结构, 减小土壤容重, 减少土壤表层径流量, 提高土壤饱和含水量, 增加土壤水分渗透能力和吸水储水能力, 以达到水分涵养功能. 因此, 本研究通过土壤耕层饱和含水量和土壤水的价格来估算玉米田不同种植模式的水分涵养价值. 另外, 由于无法得到土壤水的价格, 所以本研究利用影子价格法, 建造同等持水量水库库容成本替代土壤水价格. 计算公式如下:

$$V_w = \theta_f \times h \times \rho \times P_w \quad (18)$$

式中:  $V_w$  为农田水分涵养价值(元/hm<sup>2</sup>);  $\theta_f$  为土壤饱和含水量(%).

## 2 结果与分析

### 2.1 农产品供给价值

根据武威试验站和市场调研的数据,单作春玉米、春玉米-毛叶苕子(压青)和春玉米-针叶豌豆(跟茬)三种种植模式的春玉米产量分别为14 180 kg/hm<sup>2</sup>、14 430 kg/hm<sup>2</sup>和13 830 kg/hm<sup>2</sup>,春玉米、毛叶苕子和针叶豌豆播种量分别为60 kg/hm<sup>2</sup>、15 kg/hm<sup>2</sup>和112.5 kg/hm<sup>2</sup>;关于人工劳动成本,传统春玉米单作模式仅有雇人喷施农药成本,为525元/hm<sup>2</sup>,春玉米-毛叶苕子(压青)种植模式较春玉米单作,增加了种植绿肥人工劳动成本,减少了喷施农药成本,为525元/hm<sup>2</sup>,春玉米间作针叶豌豆(跟茬)增加了种植绿肥和收获绿肥人工劳动成本,同样减少了喷施农药成本,为1 125元/hm<sup>2</sup>.农机方面,由于春玉米单作和春玉米-绿肥种植模式均进行统一的翻耕、播种和收割等耕作程序,故农机投入均一致.

综合上述参数,根据公式(1)计算得到不同春玉米-绿肥种植模式农产品供给功能价值(见表1).

表1 春玉米不同种植模式农产品供给价值/万元·hm<sup>-2</sup>

春玉米种植模式	春玉米产值	绿肥籽粒产值	绿肥干草产值	化肥投入成本	种子投入成本	农机投入成本	农药投入成本	人工劳动成本	总成本	总产值	农产品供给价值	投入产出比
A	2.552	0	0	0.267	0.120	0.465	0.053	0.053	0.958	2.552	1.594	2.664
B	2.598	0	0	0.267	0.144	0.465	0.015	0.053	0.944	2.598	1.654	2.752
C	2.490	1.125	0.167	0.267	0.188	0.465	0.015	0.113	1.048	3.782	2.734	3.609

注:A为单作春玉米;B为春玉米-毛叶苕子(压青);C为春玉米-针叶豌豆(跟茬).

由表1可知,3种植植模式下农田生态系统的投入成本表现为:春玉米-绿肥种植模式较春玉米单作增加了种子投入成本和人工劳动成本,但明显减少了农药投入成本,减少比率高达71.7%.春玉米-毛叶苕子(压青)投入总成本为0.944万元/hm<sup>2</sup>,较春玉米单作降低了1.4%.春玉米-针叶豌豆(跟茬)投入总成本为1.048万元/hm<sup>2</sup>,较春玉米单作增加了9.39%,该模式投入总成本升高主要是增加了收获绿肥的劳动成本.在春玉米产量方面,春玉米-毛叶苕子(压青)较春玉米单作增产1.8%,春玉米-针叶豌豆(跟茬)却减产2.43%,这表明绿肥压青处理下的春玉米产量高于跟茬处理.但是,从3种植植模式的总产出而言,由于春玉米-针叶豌豆(跟茬)收获了针叶豌豆籽粒和干草,其产出较春玉米-毛叶苕子(压青)和春玉米单作分别增加31.31%和35.52%.

综合3种不同种植模式下的农田生态系统的成本投入和农产品产出,春玉米-毛叶苕子(压青)和春玉米单作2种植植模式下的农田系统农产品供给服务价值无明显差异,春玉米-毛叶苕子(压青)较春玉米单作仅增加3.76%,春玉米-针叶豌豆(跟茬)与春玉米-毛叶苕子(压青)和春玉米单作2种植植模式的农产品供给服务价值差异显著,增加比率分别为39.50%和41.70%.在产投比方面,春玉米-绿肥种植模式比春玉米单作产投比增加了3.30%~35.47%,这表明春玉米-绿肥农田生态系统能够为农户带来经济收益.

### 2.2 土壤有机质价值

武威试验站2017—2018年进行的绿肥连续种植对土壤有机质含量影响的定位试验结果发现,种植绿肥后土壤腐殖质具有显著的变化,有机质含量在种植绿肥后比种植绿肥前有所增加.在1个种植周期内,春玉米-毛叶苕子(压青)种植模式在0~20 cm土层土壤有机质增加量为0.60 g/kg,而春玉米-针叶豌豆(跟茬)种植模式增加0.40 g/kg(见表2).由表2可知,在1个种植周期内,春玉米-毛叶苕子(压青)在0~20 cm土层土壤有机质累积量为92.57 kg/hm<sup>2</sup>,累积价值为136.07元/hm<sup>2</sup>,而春玉米-针叶豌豆(跟茬)在0~20 cm土层土壤有机质累积量为61.71 kg/hm<sup>2</sup>,累积价值为90.72元/hm<sup>2</sup>.可见,春玉米-毛叶苕子(压青)的土壤有机质累积量和累积价值均高于春玉米-针叶豌豆(跟茬),这主要是因为春玉米间作毛叶苕子压青处理比春玉米间作以收获籽粒为主的针叶豌豆跟茬处理更能促进土壤微生物活性,增加土壤有机质含量,提高土壤有机质累积价值.

表2 玉米间作绿肥农田生态系统土壤有机质累计价值

春玉米种植模式	土壤有机质含量/g·kg <sup>-1</sup>		土壤有机质累积量/kg·hm <sup>-2</sup>	土壤有机质累积价值/元·hm <sup>-2</sup>
	种植绿肥前	种植绿肥后		
B	20.7	21.3	92.57	136.07
C	20.7	21.1	61.71	90.72

注:B为春玉米-毛叶苕子(压青);C为春玉米-针叶豌豆(跟茬).

### 2.3 土壤营养物质循环价值

采用武威试验站提供的玉米间作绿肥2017年和2018年的土壤养分含量数据,根据公式(4)~(6),计算出春玉米间作不同绿肥农田生态系统的土壤营养物质循环价值(见表3)。

由表3可知,春玉米间作绿肥的碱解氮和有效磷的价值是单作春玉米的4~6倍和1.2~1.6倍,表明绿肥翻压还田有利于土壤中的氮素和磷素的累积,呈现出良好的肥田效果。3种农田生态系统的速效钾价值均为负值,表示出消耗效应,这可能是由于绿肥以及主作物生长期强烈的吸附钾素作用造成的。春玉米-毛叶苕子(压青)的土壤营养物质循环总价值较单作春玉米增加了4倍,而春玉米-针叶豌豆(跟茬)的土壤营养物质循环价值较单作春玉米降低了1.6倍,这可能是由于种植密度较高的针叶豌豆在生长旺盛时期消耗过多的土壤养分<sup>[11]</sup>,而跟茬还田又不足以补充消耗的土壤养分,使春玉米-针叶豌豆(跟茬)的土壤营养物质循环价值低于单作春玉米。

表 3 春玉米间作不同绿肥农田生态系统土壤营养物质循环价值

春玉米种植模式	碱解氮		有效磷		速效钾		总价值/元·hm <sup>-2</sup>
	累积量 /kg·hm <sup>-2</sup>	累积价值 /元·hm <sup>-2</sup>	累积量 /kg·hm <sup>-2</sup>	累积价值 /元·hm <sup>-2</sup>	累积量 /kg·hm <sup>-2</sup>	累积价值 /元·hm <sup>-2</sup>	
A	3.192	13.726	34.048	180.454	-37.240	-130.340	63.840
B	18.886	81.210	55.860	296.058	-31.920	-111.720	265.548
C	13.300	57.190	42.028	222.748	-69.160	-242.060	37.878

注: A为单作春玉米; B为春玉米-毛叶苕子(压青); C为春玉米-针叶豌豆(跟茬)。

### 2.4 土壤保持价值

首先是土壤保持量。由表4可知,春玉米间作绿肥农田生态系统的土壤保持量是单作春玉米的7~12倍。可见春玉米间作绿肥的生态效应明显高于单作春玉米,这主要源于春玉米间作绿肥的农田种植模式能提高农田植被覆盖率,改良土壤团粒结构的稳定性,增加土壤水分的渗透性,减少西北地区风沙带来的风蚀以及暴雨带来的水蚀。另一方面,春玉米-毛叶苕子(压青)土壤保持量最高,达47 150 kg/hm<sup>2</sup>,这主要得益于春玉米-毛叶苕子(压青)有相对较多的生物量,使植被覆盖率更高,从而抵挡土壤侵蚀的能力更强。

其次是土壤保持价值。由表4可知,以武威试验站提供的2018年数据为节点,根据公式(8)~(10),得出不同种植模式下土壤保持价值在179~2 070 元/hm<sup>2</sup>之间。其中以保持土壤肥力价值和减少土壤废弃价值为主要的功能价值,由于西北地区雨水以及风沙对耕地土壤冲击力大,潜在的耕地水土流失巨大,但春玉米间作绿肥相对较高的植被覆盖率大幅度降低了耕地水土流失量,减少了土壤养分流失以及土地废弃面积扩大。另外,由于风蚀的影响主要集中在土地废弃上<sup>[12]</sup>,所以可以从土地废弃价值中粗略估算出玉米间作绿肥农田生态系统的防风固沙价值在460~480 元/hm<sup>2</sup>之间。

表 4 春玉米间作绿肥农田生态系统土壤保持价值

春玉米种植模式	土壤保持量 /kg·hm <sup>-2</sup>	保持土壤肥力 价值/元·hm <sup>-2</sup>	减少土壤废弃 价值/元·hm <sup>-2</sup>	减少泥沙淤积 价值/元·hm <sup>-2</sup>	总价值 /元·hm <sup>-2</sup>
A	4 210.000	130.887	40.391	8.305	179.583
B	47 150.000	1 516.205	460.510	93.018	2 069.733
C	33 220.000	1 037.007	472.323	65.536	1 574.867

注: A为单作春玉米; B为春玉米-毛叶苕子(压青); C为春玉米-针叶豌豆(跟茬)。

### 2.5 气体调节价值

由表5可知,3种不同种植模式的农田净生长量在15 000~19 500 kg/hm<sup>2</sup>之间,农田作物光合作用固碳价值在6 357~8 264 元/hm<sup>2</sup>之间,释氧价值在6 783~8 817 元/hm<sup>2</sup>之间,并且春玉米-毛叶苕子(压青)的固碳释氧价值高于春玉米-针叶豌豆(跟茬)和单作春玉米,可见农田净生长量相对较多的春玉米-毛叶苕子种植模式有助于增加土壤的O<sub>2</sub>排放量和CO<sub>2</sub>的固定量,固碳释氧的价值也相对较高。农田绿肥在固碳释氧的同时,也会在翻压还田时增加玉米田的温室气体排放量,作物在生长过程中向大气排放的N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>三种温室气体产生的总负价值在349.416~425.929 元/hm<sup>2</sup>之间,并且春玉米间作绿肥的温室气体排放量高于单作春玉米。总之,与单作春玉米种植模式相比,春玉米间作绿肥种植模式的气体调节总价值均有提高,其中春玉米-毛叶苕子(压青)提高30.22%,春玉米-针叶豌豆(跟茬)提高19.95%。

表5 春玉米间作绿肥农田生态系统气体调节价值

春玉米 种植模式	干物质质量 /kg·hm <sup>-2</sup>	固碳价值 /元·hm <sup>-2</sup>	释氧价值 /元·hm <sup>-2</sup>	温室气体排放价值/元·hm <sup>-2</sup>			气体调节总 价值/元·hm <sup>-2</sup>	
				CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>		
A	15 000	6 357.000	6 783.000	-0.024	203.840	145.600	-349.416	12 790.584
B	19 500	8 264.100	8 817.900	5.401	274.706	145.821	-425.929	16 656.071
C	18 000	7 628.400	8 139.600	5.401	274.706	145.821	-425.929	15 342.071

注: A为单作春玉米; B为春玉米-毛叶苕子(压青); C为春玉米-针叶豌豆(跟茬)。

## 2.6 水涵养价值

由表6可知,与单作春玉米相比,春玉米间作绿肥种植模式的水分涵养功能价值均有提高,根据武威试验站的数据,春玉米-毛叶苕子(压青)提高3.45%,春玉米-针叶豌豆(跟茬)提高1.72%,春玉米-毛叶苕子(压青)与春玉米-针叶豌豆(跟茬)水分涵养功能价值仅相差109.326元/hm<sup>2</sup>,水分涵养功能基本相同。这表明:玉米田通过绿肥发达的根系提高了土壤水分的渗透能力,当绿肥翻压还田后,密集的根系在腐解过程中,增加了水稳性团聚体,减小了土壤耕层的容重,从而增加了土壤耕层孔隙度,进而增强了土壤的蓄水能力<sup>[10]</sup>。

表6 春玉米间作绿肥农田生态系统水涵养价值

春玉米种植模式	土壤饱和含水量/%	水涵养价值/元·hm <sup>-2</sup>
A	29	6 340.908
B	30	6 559.560
C	29.5	6 450.234

注: A为单作春玉米; B为春玉米-毛叶苕子(压青); C为春玉米-针叶豌豆(跟茬)。

## 2.7 玉米农田生态系统服务功能总价值评估

由表7可知,与单作春玉米相比,春玉米-毛叶苕子(压青)与春玉米-针叶豌豆(跟茬)的生态服务总价值分别增长19.37%和43.74%。玉米间作绿肥的生态服务价值为4.222~5.084万元/hm<sup>2</sup>,是初级农产品生产价值(直接经济效益)的1.8~2.6倍,是总投入成本的4.8倍左右。两种春玉米间作绿肥农田生态系统服务功能价值中,农产品供给价值和气体调节价值对总价值的贡献率相对较大,其中:农产品供给价值贡献率在39%~54%之间,气体调节价值贡献率在30%~39%之间。土壤有机质累积价值贡献率最小,仅在1.7%~3.2%之间。

表7 春玉米间作绿肥农田生态系统服务功能总价值

春玉米 种植 模式	农产品供 给价值/ 元·hm <sup>-2</sup>	总投入 成本/ 元·hm <sup>-2</sup>	土壤有机 质累积价 值/元·hm <sup>-2</sup>	土壤营养 物质循环 价值/元·hm <sup>-2</sup>	土壤保 持价值 /元·hm <sup>-2</sup>	气体调 节价值 /元·hm <sup>-2</sup>	水分涵 养价值 /元·hm <sup>-2</sup>	总价 值/万 元·hm <sup>-2</sup>
A	15 950.8	9 573.2	45.358	63.84	179.583	12 790.584	6 340.908	3.537
B	16 535.8	9 438.2	136.075	265.548	2 069.733	16 656.071	6 559.560	4.222
C	27 340.24	10 473.2	90.717	37.878	1 574.867	15 342.071	6 450.234	5.084

注: A为单作春玉米; B为春玉米-毛叶苕子(压青); C为春玉米-针叶豌豆(跟茬)。

另外,春玉米-针叶豌豆(跟茬)的生态服务总价值大于春玉米-毛叶苕子(压青),这是由于春玉米-针叶豌豆(跟茬)种植模式收获的针叶豌豆籽粒以及干草增加了初级产品生产价值。如果仅计算生态效益指标价值,即土壤有机质累积价值、土壤营养物质循环价值、土壤保持价值、气体调节价值和水分涵养价值五个指标,春玉米-毛叶苕子(压青)的生态服务总价值比春玉米-针叶豌豆(跟茬)提高0.219万元/hm<sup>2</sup>,这说明压青处理的绿肥生态价值要大于跟茬处理。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

本研究初步核算了西北河西灌溉区春玉米间作不同绿肥农田生态系统服务功能总价值,有利于全面认识绿肥的综合效益,为西北河西灌溉区玉米田种植绿肥制定生态补偿政策提供理论和数据依据。但是,仍有一些问题需深入探讨:第一,有关绿肥生态价值实现方面。绿肥“理论”生态价值转化为“真实”生态价值涉及诸多重

大基础理论、关键技术、机制体制以及政策保障等科学技术难题,那么,如何解决绿肥生态价值实现过程中的技术障碍和瓶颈,建立多样化的生态价值实现途径与机制成为本文下一步的研究重点.第二,有关生态补偿推动生态价值实现方面.生态补偿是绿肥最重要的生态价值实现途径,因此,估算不同地区、不同耕作模式下绿肥种植生态补偿标准,促进绿肥生态价值实现,推进区域耕地保护和高质量发展是本文后续研究的关键问题.第三,有关“绿肥+”产业促进生态价值实现方面.“绿肥+”产业是实现绿肥生态价值的直接途径,通过发展“绿肥+”产业,间接实现生态价值,所以,探索建立“绿肥+”清洁农业产业模式,如何提升“绿肥+”产品的价值需进一步探讨.第四,有关指标选取和数据获取方面.评估种植绿肥农田生态系统服务功能价值是一个非常复杂的过程,评估指标涉及土壤养分、气体调节、水分涵养、景观、生物多样性等多个方面,但是在本文中,景观以及生物多样性等服务功能的指标没有体现,这可能直接导致农田生态服务功能价值偏低,因此,接下来要加强对难以量化的生态服务功能指标的量化研究,完善西北地区种植绿肥农田生态系统服务功能价值评估指标体系和评估方法.

### 3.2 结论

本研究采用生态经济学方法,选取农产品供给、土壤有机质累积、土壤营养物质循环、土壤保持、气体调节和水分涵养等指标计算西北灌溉区春玉米间作绿肥农田生态系统服务功能价值,得出以下结论:

(1) 农产品供给价值是玉米间作绿肥农田生态系统中占比最大的生态服务功能价值(>39%),其次为气体调节功能价值(30%~39%),而土壤有机质累积服务价值最低(<3.2%).

(2) 玉米间作绿肥的生态服务总价值为4.222~5.084万元/hm<sup>2</sup>,约为初级农产品生产价值(直接经济效益)的1.8~2.6倍,是总投入成本的4.8倍左右,而单作春玉米生态服务总价值是其总成本的3.7倍.这表明春玉米间作绿肥农田生态系统单位面积投入产生的生态价值要大于春玉米单作.

(3) 如果仅计算生态效益指标价值,春玉米-毛叶苕子(压青)的生态服务总价值比春玉米-针叶豌豆(跟茬)提高0.219万元/hm<sup>2</sup>,这说明压青处理的绿肥生态价值要大于跟茬处理.

### 参考文献:

- [1] 卢秉林,包兴国.河西绿洲灌区玉米与绿肥间作模式对作物产量和经济效益的影响[J].中国土壤与肥料,2014,2:67-71.
- [2] 谢高地,肖玉.农田生态系统服务及其价值的研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(6):645-651.
- [3] SHAH S M, LIU G Y. Emergency-based valuation of agriculture ecosystem services and dis-services[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239(1): 1-17.
- [4] 曹卫东,包兴国,徐昌旭.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
- [5] 高菊生,曹卫东,李冬初,等.长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J].生态学报,2011,31(16):4542-4548.
- [6] 肖玉,谢高地.华北平原小麦-玉米农田生态系统服务评价[J].中国生态农业学报,2011,19(2):429-435.
- [7] 盛婧,陈留根,朱普平.稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1541-1545.
- [8] 王显国.覆盖作物高效管理(译著)[M].北京:电子工业出版社,2016.
- [9] 张久东,包兴国.长期施用绿肥减施化肥对毛叶苕子产草量和土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2017,6:66-70.
- [10] 马艳琴,黄国忠.紫云英配施氮肥对稻田生态系统服务功能的影响[J].自然资源学报,2018,33(10):1755-1765.
- [11] LU C H, ITTERSUM M K, RABBINGE R. Quantitative assessment of resource-use efficient cropping systems: a case study for Ansai in the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 311-326.
- [12] 任志远,刘焱序.西北地区植被保持土壤效应评估[J].资源科学,2013,35(3):610-617.
- [13] 马莉,牛叔文,马利邦.甘肃省耕地资源转变为建设用地的价值损失评估[J].生态与农村环境学报,2010,26(5):407-412.
- [14] 任继周,林慧龙,未丽.草地农业是甘肃农业可持续发展的重要途径[J].草地学报,2009,17(4):405-412.
- [15] 姜继韶.施氮和轮作对黄土高原旱塬区土壤温室气体排放的影响[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [16] 吕晓东.干旱绿洲灌区典型农田温室气体排放及其减排效应[D].兰州:兰州大学,2019.

责任编辑:张自强