



生态经济

*Ecological Economy*

ISSN 1671-4407, CN 53-1193/F

## 《生态经济》网络首发论文

题目： 农田生态系统服务价值核算：指标体系构建及应用研究  
作者： 胡晓燕，于法稳，徐湘博，牛坤玉  
网络首发日期： 2022-10-10  
引用格式： 胡晓燕，于法稳，徐湘博，牛坤玉. 农田生态系统服务价值核算：指标体系构建及应用研究[J/OL]. 生态经济.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.f.20221009.0913.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 农田生态系统服务价值核算：指标体系构建及应用研究

胡晓燕<sup>1</sup>，于法稳<sup>1</sup>，徐湘博<sup>2</sup>，牛坤玉<sup>3</sup>

(1. 中国社会科学院 农村发展研究所，北京 100732；

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所，北京 100101；

3. 中国农业科学院 农业经济与发展研究所，北京 100081)

**摘要：**新发展阶段，准确核算农田生态系统服务价值有助于生态产品价值实现、耕地生态补偿政策优化和保障粮食安全。基于对生态系统服务分类和中间服务的理论分析，结合农田生态系统自身的特点，构建了一套准确的农田生态系统服务价值核算指标体系，由供给、社会保障、调节、文化服务四大类 12 项二级指标和 3 项负面价值指标构成。基于该指标体系对黑龙江省开展应用研究，结果表明，2019 年黑龙江省农田生态系统服务总价值为 11 667.01 亿元，是农产品供给价值的 3.09 倍，相当于当年该省 GDP 的 85.71%。其中，保障粮食安全的价值最大，其次是供给产品；调节服务价值中的释氧和空气净化价值明显高于其他价值。负面价值中，水资源消耗价值最大，为 125.58 亿元，其次是农用化学品污染。1999—2019 年，三大类服务价值均有不同程度的增长，社会保障服务价值增幅最大。通过对比其他研究结果发现，本研究构建的指标体系及应用研究结果可靠，且剔除中间服务价值可纠正 1.65%~76.98% 的偏差，为农田生态系统服务价值核算和相关政策提供重要依据。

**关键词：**农田；生态系统服务价值；指标体系；中间服务；黑龙江省

**中图分类号：**F326.1；F062.2      **文献标识码：**A

## Accounting of Cropland Ecosystem Services: Indicator System Construction and Application

HU Xiaoyan<sup>1</sup>, YU Fawen<sup>1</sup>, XU Xiangbo<sup>2</sup>, NIU Kunyu<sup>3</sup>

(1. Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In a new development stage, accounting accurately of cropland ecosystem services is helpful to realize the value of ecological products, optimize the eco-compensation policy for cropland and ensure food security. In this study, an accurate indicator system for accounting the cropland ecosystem services is established based on theoretical analysis about classification of ecosystem services and intermediate services, and the specific characteristics of cropland ecosystems. The indicator system consists of 12 sub-categories under provisioning services, social security services, regulating services and cultural services, and 3 indicators of negative value. According to the indicator system established, the value of cropland ecosystem services in Heilongjiang Province has been accounted for application. The results show that the total value of cropland ecosystem services in Heilongjiang Province is 1166.701 billion yuan in 2019, which is 3.09 times of the agricultural products' value and is more than 85% of the province's GDP.

Thereinto, the value of ensuring food security is the largest, followed by provisioning services; the values of oxygen production and air purification are obviously higher than other values among the regulating services. Among the negative values, the value of water consumption which is 12.56 billion yuan is the largest, followed by agricultural chemicals pollution. From 1999 to 2019, the service values of three categories are increased with various levels, and social security services increased the most. Compared with other studies, the indicator system constructed and results of Heilongjiang Province are reliable, and the deviation of 1.65%-76.98% can be corrected by eliminating the value of intermediate services, which can provide an important basis for accounting study of cropland ecosystem services and related policies.

**Key words:** cropland; ecosystem services value; indicator system; intermediate services; Heilongjiang Province

**基金项目:** 中国社会科学院博士后创新项目“农田生态系统服务价值评估研究”; 中国社会科学院创新工程 A 类项目“农业农村绿色发展的理论与政策研究”(2018NFSA01); 国家自然科学基金青年基金(41901255); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目“‘双碳’背景下农业绿色发展战略路径研究”(Y2022ZK03)

**第一作者简介:** 胡晓燕, 博士, 助理研究员, 中国社会科学院农村发展研究所博士后, 研究方向为生态与环境经济学、农村环境。E-mail: huxiaoyan@cass.org.cn

**通讯作者简介:** 于法稳, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为生态经济学理论与方法、农业可持续发展。E-mail: yufaw@cass.org.cn

## 0 引言

自 Costanza 等<sup>[1]</sup>在期刊 *Nature* 上发表了关于全球生态系统服务价值的文章以来, 生态系统服务价值评估得到广泛关注。发展至当下, 不论在国外还是国内, 环境经济核算均属于重要的新领域, 尤其是生态系统服务价值核算, 旨在评估自然生态系统为人类生存与发展提供的支撑和福祉<sup>[2]</sup>, 被认为具有解决可持续性问题的潜力<sup>[3]</sup>。

在国外, 环境经济核算启动较早, 始于 20 世纪 50 年代。人们认识到环境资源日益重要, 只有纳入经济核算体系, 才能避免过度利用甚至滥用。2012 年经联合国统计委员会通过了《2012 年环境经济核算体系: 中心框架》(简称 SEEA2012)<sup>[4]</sup>, 该框架成为了首个环境经济核算体系的国际统计标准, 意义重大。另外, 在起草 SEEA2012 的过程中发现, 关于生态系统核算是一个不易推进的议题, 所以支持拟订了 *System of Environmental-economic Accounting 2012: Experimental Ecosystem Accounting* (简称 EEA) 手册<sup>[5]</sup>, 成为指导各国开展生态系统核算的国际参考。在国内, 对于自然资源价值核算的认识、理论、方法的研究起步较晚, 但积极推进。2004 年, 《中国绿色国民经济核算研究》(简称绿色 GDP 核算) 启动, 党的十八届三中全会提出探索编制自然资源资产负债表并于 2015 年印发试点方案, 关于核算自然资源资产与生态系统服务价值的探索和研究逐渐增多。2021 年中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》, 要求到 2025 年初步建立比较科学的生态产品价值核算体系, 并“探索将生态产品价值核算基础数据纳入国民经济核算体系”。国内积极与国际接轨, 并要摸清“绿水青山”的家底, 促进生态产品价值的实现, 因此, 准确核算生态系统服务价值迫切且重要。

生态系统服务相当于传统经济理论认可的四种资本中的“自然资本”。从经济学角度来看, 自然是一种资产, 它提供的商品和服务流是维持生命和提高生活质量的基础。生态系统服务本质上是以人类为中心的,

由此产生了保护自然以确保其持续供给的论点<sup>[1, 6]</sup>。目前, 生态系统服务价值评估对象多集中于森林和湿地生态系统, 或某区域内所有生态系统。关于后者, 欧阳志云等<sup>[7]</sup>提出了“生态系统生产总值”(gross ecosystem product, 简称 GEP) 的概念, 相关研究及试点不断增多, 并出台了浙江省《生态系统生产总值(GEP)核算技术规范—陆域生态系统》(DB33/T 2274—2020) (简称《规范》(DB33/T 2274—2020))<sup>[8]</sup>。王金南等<sup>[9]</sup>解读《陆地生态系统生产总值核算技术指南》时认为, 对生态系统价值核算进行规范化有助于生态产品价值的实现。经对比发现, GEP 中对于农田生态系统服务价值更多的关注了其供给服务的价值, 对其他方面的价值有所忽视。

实际上, 农田生态系统作为重要的人工生态系统, 除了供给农产品外, 还具有重要的生态功能和社会保障功能。农田生态系统与森林、湿地等生态系统一样, 具有供给、调节、支持和文化服务价值。除此, 农田生态系统还具有重要的社会保障功能, 一方面解决了大批农村居民生存及就业问题, 缓解了社会矛盾<sup>[10]</sup>, 另一方面为我国粮食安全提供了重要保障。研究表明近期和中长期中国口粮绝对安全<sup>[11]</sup>, 粮食主产区为关键贡献主体<sup>[12]</sup>, 未来粮食不安全问题可能出现在流通与贸易上<sup>[13-14]</sup>。“18 亿亩耕地红线”是中央确定的关乎国家经济建设与发展全局的重大决策, 同时, 18 亿亩耕地的生态和社会保障价值不容忽视, 准确核算有助于摸清“绿水青山”的潜在价值, 为农田生态产品价值的实现及生态补偿等提供可靠依据。因此, 农田生态系统的多功能性必须得到重视, 服务价值需要全面核算, 而非单一的供给服务价值<sup>[15]</sup>。

在有限的农田生态系统服务价值评估文献中, 缺乏符合农田生态系统自身特征的统一的核算指标体系, 核算结果准确性有待提升。核算指标和核算方法有主观地借鉴森林、湿地生态系统的, 有参照Costanza等<sup>[1, 16]</sup>或谢高地等<sup>[17]</sup>的参数进行评估的<sup>[18]</sup>, 指标的选取多偏主观, 且没有理清指标之间的关系, 容易使得评估指标中包含中间服务, 造成重复计算<sup>[19]</sup>。

因此, 本研究将在深入研究国内外生态系统服务价值核算理论的基础上, 构建准确的农田生态系统服务价值核算指标体系并进行应用研究, 为农田生态系统服务价值核算和相关政策的制定提供准确依据。本文的主要贡献在于以下两点: 第一, 经深入的理论分析, 鉴别农田生态系统服务中的中间服务并剔除, 构建了准确的农田生态系统服务价值核算指标体系, 为科研和决策提供了科学的理论依据。第二, 通过黑龙江省的应用研究, 引起对农田生态系统除供给服务外的生态和社会保障服务的高度重视, 为相关政策提供可靠依据。

## 1 理论分析

### 1.1 生态系统服务的分类

“生态系统服务”这个词最初是在*Extinction: The cause and consequences of the disappearance of species*一书中被提出, 将生态系统功能惠益人类的特点称为生态系统服务。Daily<sup>[20]</sup>在研究中指出生态系统服务是自然生态系统及其所包含的物种为人类生活和发展需要提供的服务, 并且他将生态系统服务划分为两大类10种子类型。Costanza等<sup>[1]</sup>在*Nature*发表的文章中提出人们直接或间接地从生态系统功能中获得产品或服务, 由生态系统产出的产品和服务合称为生态系统服务; 并将生态系统服务分为17种类型。

之后, 联合国千年生态系统评估 (millennium ecosystem assessment, 简称MA)<sup>[6]</sup>将生态系统服务定义为“人们从自然系统获得的效益”, 并将生态系统服务依据功能分为供给、调节、文化和支持服务四大类 (表 1), 细分为20种子类型, 得到了广泛认同。

表 1 MA 对生态系统服务的分类

类型	定义	举例
----	----	----

供给服务	从生态系统获得的各种物质产品	食物、淡水、薪材、生化药剂、遗传资源等
调节服务	从生态系统过程的调节作用获得的各种收益	调节气候、疾病控制、水资源调节、净化水质、授粉等
文化服务	通过生态系统获得的娱乐休闲、美学欣赏等方式的收益	精神与宗教、消遣与生态旅游、美学、灵感、教育、地方感、文化遗产等
支持服务	对所有其他生态服务的生产必不可少的服务	土壤形成、积累营养物质、初级生产等

2013年，欧阳志云等<sup>[7]</sup>提出了GEP的概念，即生态系统为人类福祉和经济社会可持续发展提供的最终产品与服务价值的总和，并将其划分为生态系统产品、生态调节服务、生态文化服务三大类型。

综上所述，Daily<sup>[20]</sup>、Costanza等<sup>[1]</sup>及MA<sup>[6]</sup>这三项研究中对生态系统的定义和分类是文献中最常引用的<sup>[21]</sup>。依据这些主流的生态系统服务分类，大量的生态系统服务价值被评估。本研究将依据这三篇经典文献及欧阳志云等<sup>[7]</sup>的研究中对GEP中的分类，对农田生态系统服务的大类型进行初次分类。

### 1.2 核算中的中间服务

对生态系统服务的分类，国内外研究中最常引用的是Daily<sup>[20]</sup>、Costanza等<sup>[1]</sup>及MA<sup>[6]</sup>这三项研究的结果。深入研究发现，这三种关于生态系统服务的分类均是侧重从生态学角度出发的，与国民经济核算体系的连通性不够；且在试图对生态系统服务价值进行评估或核算时，它可能导致某些服务价值的重复计算<sup>[22]</sup>，即使目前重复计算的问题在文献中很少被承认。

本文经过深入的理论分析（图1）发现，在这几种经典分类的基础上，将生态系统服务分为中间服务和最终服务，只将最终服务产生的价值加总，能很好地避免重复计算的问题，且能更好地与国民经济核算体系接轨。

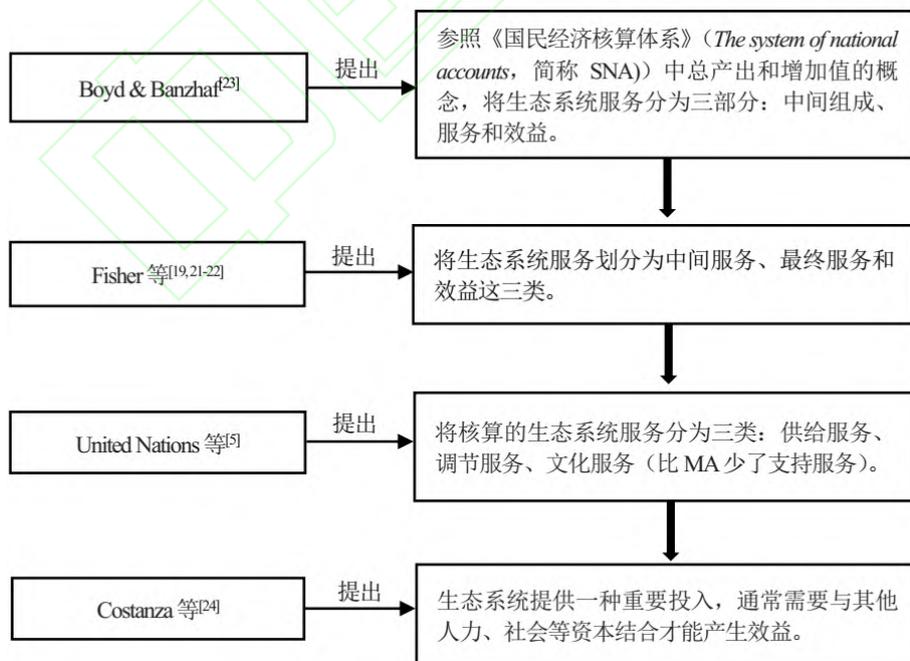


图1 生态系统服务分类的重要转折过程

Boyd & Banzhaf<sup>[23]</sup>试图将生态系统核算与国民经济核算体系联系起来，参照其中总产出和增加值的概念，给生态系统服务下了一个新定义：生态系统服务是直接用于享受、消耗或使用的自然的组成部分，以产生人类福祉。他们把生态系统服务分为中间组成部分、服务、效益三部分。

Fisher等<sup>[21]</sup>对已有的生态系统服务的定义进行了总结，并且在很大程度上借鉴了Boyd & Banzhaf<sup>[23]</sup>的观点给生态系统服务下了新定义，即“生态系统服务是指生态系统被用来产生人类福祉的方面”。出于评估的目的，Fisher等<sup>[22]</sup>推荐借鉴传统经济核算系统中使用的限定词——“中间的 (intermediate)”和“最终的 (final)”，并将生态系统服务划分为三类：中间服务、最终服务和效益<sup>[18]</sup>。根据这个定义，生态系统过程和结构是生态系统服务，中间服务或最终服务的划分依据是它们与人类福祉的联系程度，即它们是起中间作用还是最终作用。总之，生态系统服务是一种生态现象，效益是直接影响人类福祉的事物。

根据EEA手册<sup>[5]</sup>，生态系统服务产生于生态系统资产，可将生态系统服务视为生态系统对经济体系及其他人类活动的“贡献”或称“效益”(EEA段2.19)。该核算手册将生态系统服务分为供给、调节和文化服务三类。相比MA<sup>[6]</sup>的分类，缺少了代表生态系统中间过程的支持服务。这与欧阳志云等<sup>[7]</sup>提出的GEP中划分的三类服务一致。为了实现这些效益，自然资本（不需要人类活动来建立或维持）必须与其他形式的资本（需要人类来建立或维持）相互作用<sup>[24]</sup>。

中间服务与支持服务两者内涵相近但不完全等同。支持服务是“对所有其他生态服务的生产必不可少的服务”，中间服务是生态系统服务中对人类福祉起中间作用的服务，而非直接影响。对比发现，支持服务理论上属于中间服务，少数调节服务也属于中间服务，具体需从福利经济学和生态学角度来判断。除此，王金南<sup>[9]</sup>等解读《陆地生态系统生产总值核算技术指南》时表明，该指南“对存在争议的土壤形成、养分循环、生物多样性等支持服务未予核算”。通过将生态系统服务类型划分为中间服务、最终服务，可以从理论上揭示这些服务有争议的真正原因，即这些服务是中间服务，所以不能计入总价值。

因此，国际和国家层面的核算侧重于生态系统的最终服务，中间服务对全面理解生态系统功能或服务间的关系非常必要，但不是优先测算领域。在农田生态系统及其他生态系统服务价值的核算中，在将生态系统服务类型依据前文中的分析进行大类型划分的基础上，再将子类型从中间服务和最终服务角度分类，只将最终服务产生的价值加总，能避免重复计算且能更好地与经济核算体系接轨。

## 2 核算指标体系与方法

### 2.1 核算思路

首先分别核算指定区域内农田生态系统服务各指标的功能量，再由特定时段内（通常以年为单位）该区域的当年市场价格或影子价格核算各项服务指标的价值量，最后根据公式（1）核算出特定时段内、特定区域内的农田生态系统服务的总价值。核算公式如下：

$$GV = PV + SV + RV + CV - NV \quad (1)$$

式中：GV—农田生态系统服务总价值，单位：元/a；PV—农田生态系统供给服务价值，单位：元/a；SV—农田生态系统社会保障服务价值，单位：元/a；RV—农田生态系统调节服务价值，单位：元/a；CV—农田生态系统文化服务价值，单位：元/a；NV—农田生态系统负面价值，单位：元/a。

### 2.2 核算指标体系

基于对生态系统服务的分类和中间服务的理论分析，结合农田生态系统自身的特点，本文构建了一套准确的农田生态系统服务价值核算指标体系。

首先，依据 Costanza 等<sup>[1]</sup>、MA<sup>[6]</sup>对生态系统服务大类型的划分，将农田生态系统服务分为供给、调节、文化、支持服务。其次，农田作为重要的生产要素，具有非常重要的保障农村居民就业和粮食安全的作用，因

此在服务大类中增加社会保障服务。再次，依据对中间服务理论分析，先对支持服务中的子类型逐一鉴别，农田生态系统服务中土壤形成和积累营养物质是漫长的过程，对人类福祉起中间作用，最终通过土壤保持服务或供给服务价值增加等体现。农业生物多样性是对农田生态系统起支持作用的战略资源，对粮食安全、农业可持续发展、乡村旅游等起到重要的支持作用。其他子类型服务中，授粉属于调节服务，但授粉是生产农产品的中间过程，人们享用的是最终收获的产品。因此，农田生态系统服务中的授粉、土壤形成、积累营养物质、生物多样性保护四项服务属于中间服务，已包含在其他最终服务价值中，因而不计入核算。最后，农田作为重要的人工生态系统，在生产过程中，会对资源和生态环境造成一些负面影响，主要包括水资源消耗、温室气体排放和农用化学品污染三个方面。

因此，结合农田生态系统自身特点，本研究提出农田生态系统服务价值核算指标体系由供给、社会保障、调节和文化四大类服务 12 项二级指标和农田生态系统对资源环境造成负面影响的 3 项指标构成（表 2）。

**表 2 农田生态系统服务价值核算指标体系**

一级指标	二级指标	指标内涵	指标对应的价值方向
供给服务	供给产品	直接利用供给产品：谷物及其他作物，蔬菜园艺，水果、坚果、饮料作物，茶及其他饮料，中药材等 <sup>a</sup>	正面
		可再生能源：薪柴、沼气、秸秆发电等	
社会保障服务	保障就业*	农村居民通过在农田里种植谷物、蔬菜、水果等获得经济收入，相当于保障了农村劳动力的就业，促进了社会安定	正面
	保障粮食安全*	农田生态系统生产足够数量的粮食，保障人们对粮食消费量的需求，从而保障粮食价格稳定和社会安定	
调节服务	涵养水源*	农田生态系统通过植物层、枯落物层、根系和土壤层拦截降水、蓄水，有效涵养土壤水分、调节地表径流、补充地下水。另外，稻田淹水期的水也能对地下水进行补充	正面
	洪水调蓄*	稻田的田埂类似水库，汛期能蓄积洪水，能缓解洪峰造成的威胁和损失	正面
	土壤保持	农田生态系统通过植物层、枯落物层、根系削减降水对土壤的侵蚀力，从而减少土壤流失、避免泥沙淤积	正面
	固碳	农田生态系统通过农作物光合作用吸收大气中的二氧化碳，合成有机物，将碳固定在植物或土壤中，保持其在大气中的平衡	正面
	释氧	农田生态系统通过农作物光合作用释放氧气，维持大气中氧气的稳定	正面
	空气净化	农田生态系统通过净化、阻滤和分解空气中的污染物（如二氧化硫、氮氧化物、粉尘等），对空气进行有效净化，改善空气质量	正面

	防风固沙	农田生态系统通过植物层、枯落物层、根系削弱风的强度和携沙能力，减少土壤流失和风沙危害	正面
	气候调节	农田生态系统通过植被蒸腾作用、稻田淹水期水面蒸发过程吸收热量，从而降低周边的气温，改善人居环境的舒适程度	正面
文化服务	休闲旅游	有些农田生态系统的景观能吸引游客来体验、休闲、康养等	正面
—	水资源消耗*	农业灌溉大量消耗水资源，导致了很多资源环境问题	负面
	温室气体排放*	农田生态系统中，稻田排放的甲烷和农用地排放的氧化亚氮都是温室气体	负面
	农用化学品污染*	农作物生长过程中使用的化肥、农药、地膜等的残留会对水体、空气、土壤环境造成污染，也会造成粮食减产	负面

注：上角标“\*”代表该项服务与森林、湿地等生态系统的服务有较大区别；a代表“直接利用供给产品”的分类参照《中国农村统计年鉴 2020》中的分类。

### 2.3 核算方法

对照本研究构建的农田生态系统服务价值核算指标体系，通过文献、政策等研究，结合农田生态系统自身特点，归纳出农田生态系统服务价值核算方法（表 3），下面进行具体阐述。

直接提供农产品是农田生态系统最主要的供给服务，除此，有些地区的农田生态系统也为居民提供可再生能源，将各单项供给产品价值相加得到供给服务价值。农田生态系统还有重要的社会保障功能，主要表现在保障农村劳动力就业和保障国家粮食安全两方面。保障就业的价值采用保障就业人数与农村最低生活保障标准相乘得到<sup>[10, 25]</sup>。除此，我国稻谷、小麦和玉米等口粮的自给率已超过 95%<sup>[26]</sup>，但生产地集中于粮食主产区，这种功能区的划定又在一定程度上限制了主产区的发展。目前核算农田生态系统保障粮食安全价值的文献有限，主要是先计算耕地的盈余/赤字量<sup>[27, 28]</sup>，再用所保障人口的最低生活保障金额的总额<sup>[29]</sup>或转化用地方式后的增收<sup>[28]</sup>来表征耕地保护机会成本的损失，即为保障粮食安全的价值。由于地处城郊的农田才有可能转化为建设用地，偏远农村地区的则不可行，所以本文采用最低生活保障金额作为影子价格来衡量保障粮食安全的价值。

农田生态系统涵养水源的方式包括截留降水和稻田淹水期对地下水的补充两种。核算截留降水的功能量依据农田生态系统范围内对降水的截留比例来计算<sup>[30, 31]</sup>，而非水量平衡法，因为后者适用于核算某一区域内的所有生态系统涵养水源的价值<sup>[7]</sup>。除此，稻田在淹水期对地下水的补充量采用稻田的面积、入渗率与淹水期天数相乘得到<sup>[32]</sup>。再用当地三种用水的加权市场价作为影子价格核算农田生态系统涵养水源的价值。稻田的洪水调蓄功能在价值评估中研究得较少，但对有些地区非常重要。其主要分为农作物植被、稻田田埂洪水调蓄两方面，但因植被的洪水调蓄价值小<sup>[31]</sup>，所以主要核算稻田田埂的洪水调蓄价值。采用替代工程法，用稻田田埂的平均高度与其夏季的平均水深之差核算功能量，以水库蓄水成本作为价格核算稻田洪水调蓄的价值。土壤保持功能量的核算参照国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582—2020）（简称《规范》（GB/T 38582—2020））<sup>[33]</sup>，后以水库清淤的工程费用作为影子价格进行价值量的核算<sup>[34]</sup>。

核算农田生态系统固碳、释氧服务的价值要先计算植物的净初级生产力（net primary productivity，简称 NPP），即植物所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分<sup>[35]</sup>。参照《规范》（GB/T 38582—2020）和相关文献<sup>[10, 35]</sup>计算净初级生产力，由光合作用方程核算出农田生态系统固碳、释氧服务的功能量，再由固碳、释氧的价格核算价值量。由于空气的流动性很强，与核算区域的空气质量关联性小，因此农田生态系统空气净化服务

的功能量以其自净能力为准，再通过《中华人民共和国环境保护税法》中的大气污染物当量税额核算空气净化的价值量。其中，《中华人民共和国应税污染物和当量值表》规定，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和粉尘污染当量值分别为 0.95 kg、0.95 kg、4 kg。

农田生态系统防风固沙服务的核算参照《规范》(GB/T 38582—2020)<sup>[3]</sup>，根据风蚀模数核算防风固沙的功能量后，采用替代成本法核算其价值量。另外，依据《规范》(DB33/T 2274—2020)<sup>[8]</sup>和欧阳志云等<sup>[7]</sup>的研究，核算植被蒸腾和水面蒸发消耗的能量后，采用替代成本法，根据达到同样效果的用电量和电的市场价格可计算相应的价值量。

农田生态系统文化服务的主要方面是休闲旅游，采用旅行费用法来核算<sup>[7,34]</sup>。

表 3 农田生态系统服务价值核算方法

服务类型	核算方法	参数含义
供给产品	$PV = PV_1 + PV_2 = \sum_{i=1}^m Q_i * P_i + \sum_{j=1}^n Q_j * P_j$	<i>PV</i> 、 <i>PV</i> <sub>1</sub> 、 <i>PV</i> <sub>2</sub> : 农田生态系统供给服务价值、农产品价值、可再生能源价值 (元/a); <i>Q</i> <sub>i</sub> : 第 <i>i</i> 种农产品的产量 (t/a); <i>Q</i> <sub>j</sub> : 第 <i>j</i> 种可再生能源的产量或使用量 (kWh/a); <i>P</i> <sub>i</sub> : 第 <i>i</i> 种农产品的市场价格 (元/t); <i>P</i> <sub>j</sub> : 第 <i>j</i> 种可再生能源的价格 (元/kWh); <i>m</i> 、 <i>n</i> : 农产品、可再生能源种类的数量
保障就业	$V_{eg} = N_{eg} * C_{ml}$	<i>V</i> <sub>eg</sub> : 农田生态系统保障就业的价值 (元/a); <i>N</i> <sub>eg</sub> : 保障就业的人数，即农村地区农业从业人数 (人); <i>C</i> <sub>ml</sub> : 农村最低生活保障标准 (元·人 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )
保障粮食安全	$V_{fs} = N_o * C_{ml} = \left( \frac{Q_f}{q_f} - N_h \right) * C_{ml} * X_f$	<i>V</i> <sub>fs</sub> : 农田生态系统保障国家粮食安全的价值 (元/a); <i>N</i> <sub>o</sub> : 农田生态系统除了保证核算区域内的粮食自给外，保障其他区域粮食安全的人口数 (人); <i>Q</i> <sub>f</sub> : 核算区域当年粮食总产量 (t/a); <i>q</i> <sub>f</sub> : 人均粮食需求量 (kg·人 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> ); <i>N</i> <sub>h</sub> : 核算区域当年的常住人口数 (人); <i>X</i> <sub>f</sub> : 单位转换系数
涵养水源	截留降水的功能量: $Q_1 = q_p * A_1 * S * E_1 * X_{w1}$	<i>Q</i> <sub>1</sub> : 农田生态系统涵养降水量 (m <sup>3</sup> /a); <i>q</i> <sub>p</sub> : 降水量 (mm/a); <i>A</i> <sub>1</sub> : 产流降水量占降水总量之比; <i>S</i> : 农田生态系统的面积 (hm <sup>2</sup> ); <i>E</i> <sub>1</sub> : 产流降水条件下农田与裸地降水径流率之差; <i>X</i> <sub>w1</sub> : 单位转换系数
	稻田淹水期对地下水的补充量: $Q_2 = I_r * S_r * D_2 * X_{w2}$	<i>Q</i> <sub>2</sub> : 稻田淹水期对地下水的补充量 (m <sup>3</sup> /a); <i>I</i> <sub>r</sub> : 稻田淹水期土壤水分的入渗率; <i>S</i> : 水稻的种植面积 (hm <sup>2</sup> );

		<p><math>D_2</math>: 稻田淹水期天数 (d);</p> <p><math>X_{w2}</math>: 单位转换系数</p>
	$V_w=(Q_1+Q_2)*P_w$	<p><math>V_w</math>: 农田生态系统涵养水源服务价值 (元/a);</p> <p><math>P_w</math>: 根据生活、工业、农业用水量加权后的市场价格 (元/m<sup>3</sup>)</p>
洪水调蓄	$Q_{fm}=(H_1-H_2)*S_r*X_f$ $V_{fm}=Q_{fm}*C_d$	<p><math>Q_{fm}</math>: 农田生态系统洪水调蓄的功能量 (m<sup>3</sup>/a);</p> <p><math>H_1</math>、<math>H_2</math>: 稻田田埂的平均高度、夏季稻田的日常平均水深 (cm);</p> <p><math>X_f</math>: 单位转换系数;</p> <p><math>V_{fm}</math>: 农田生态系统洪水调蓄的价值 (元/a);</p> <p><math>C_d</math>: (防洪) 水库的每年的蓄水成本 (元/m<sup>3</sup>)</p>
土壤保持	$Q_{sr}=S*(X_2-X_1)*X_s$ $V_{sd} = \lambda * \left(\frac{Q_{sr}}{\rho}\right) * C_{sd}$	<p><math>Q_{sr}</math>: 农田生态系统土壤保持的功能量 (t/a);</p> <p><math>X_1</math>、<math>X_2</math>: 农田生态系统、裸地的土壤侵蚀模数 (t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>);</p> <p><math>X_s</math>: 单位转换系数;</p> <p><math>V_{sd}</math>: 农田生态系统减少泥沙淤积的价值 (元/a);</p> <p><math>\lambda</math>: 土壤侵蚀流失的泥沙中需要清淤的比例;</p> <p><math>\rho</math>: 土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>);</p> <p><math>C_{sd}</math>: 水库单位库容清淤工程费用 (元/m<sup>3</sup>)</p>
固碳	$NPP = \sum_{i=1}^m \frac{Q_i * (1 - w_i)}{f_i}$ $Q_{cf}=NPP*1.63*27.27\%$ $V_{cf} = Q_{cf} * C_{CO_2}$	<p><math>NPP</math>: 农作物的净初级生产力 (t/a);</p> <p><math>w_i</math>: 农产品 <math>i</math> 的含水率 (%);</p> <p><math>f_i</math>: 农产品 <math>i</math> 对应农作物的收获指数 (即经济系数);</p> <p><math>Q_{cf}</math>: 农田生态系统通过光合作用固定 CO<sub>2</sub>的功能量 (t/a);</p> <p>27.27%: C 与 CO<sub>2</sub> 的分子量之比;</p> <p><math>V_{cf}</math>: 农田生态系统固定 CO<sub>2</sub>的价值 (元/a);</p> <p><math>C_{CO_2}</math>: 固定 CO<sub>2</sub>的成本 (元/t)</p>
释氧	$Q_{op}=1.19*NPP$ $V_{op} = Q_{op} * C_{O_2}$	<p><math>Q_{op}</math>: 农田生态系统通过光合作用释放 O<sub>2</sub>的功能量 (t/a);</p> <p><math>V_{op}</math>: 农田生态系统释氧的价值 (元/a);</p> <p><math>C_{O_2}</math>: 生产 O<sub>2</sub>的成本 (元/t)</p>
空气净化	$Q_{ap} = (Q_{SO_2} + Q_{NO_x} + Q_{PM}) * S$ $V_{ap} = \left(\frac{Q_{SO_2}}{Y_{SO_2}} + \frac{Q_{NO_x}}{Y_{NO_x}} + \frac{Q_{PM}}{Y_{PM}}\right) * S * C_{ap} * X_a$	<p><math>Q_{ap}</math>: 农田生态系统净化空气的功能量 (t/a);</p> <p><math>Q_{SO_2}</math>、<math>Q_{NO_x}</math>、<math>Q_{PM}</math>: 农田生态系统吸收 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和吸附粉尘的平均通量 (t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>);</p> <p><math>Y_{SO_2}</math>、<math>Y_{NO_x}</math>、<math>Y_{PM}</math>: SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和粉尘污染当量值 (kg);</p> <p><math>V_{ap}</math>: 农田生态系统净化空气的价值(元/a);</p> <p><math>C_{ap}</math>: 应税大气污染物每污染当量税额 (元);</p> <p><math>X_a</math>: 单位转换系数</p>
防风固沙	$Q_{sp}=S*(Y_2-Y_1)$	<p><math>Q_{sp}</math>: 农田生态系统防风固沙的功能量 (t/a);</p>

	$V_{sp}=Q_{sp}*C_{sp}$	Y <sub>1</sub> 、Y <sub>2</sub> : 农田生态系统、裸地的风蚀模数 (t • hm <sup>2</sup> • a <sup>-1</sup> ); V <sub>sp</sub> : 农田生态系统防风固沙的价值 (元/a); C <sub>sp</sub> : 固沙成本 (元/t)
气候调节	$E_{cr}=E_{pr}+E_{we}$ $V_{cr}=E_{cr}*P_e$	E <sub>cr</sub> : 农田生态系统气候调节的功能量 (kWh/a); E <sub>pr</sub> : 植被蒸腾消耗的能量 (kWh/a); E <sub>we</sub> : 稻田淹水期水面蒸发消耗的能量 (kWh/a); V <sub>cr</sub> : 农田生态系统气候调节服务的价值 (元/a); P <sub>e</sub> : 电价 (元/kWh)
休闲旅游	$CV = \frac{TC + CS}{SN} * TN$	CV: 农田生态系统文化服务价值 (元/a); TC: 调查样本中所有游客的旅行费用之和, 包括交通、门票、使用游乐设施、食宿、购物等费用及时间成本 (元); CS: 调查样本中游客的消费者剩余之和 (元); SN: 调查样本中的游客人数 (人); TN: 农田生态系统景观接待游客总人数 (人/a)
水资源消耗	$V_{wc}=Q_{wc}*P_w$	V <sub>wc</sub> : 农田生态系统消耗水资源的价值 (元/a); Q <sub>wc</sub> : 农业用水量 (m <sup>3</sup> )
温室气体排放	$Q_{ghg} = 25 * Q_{CH_4} + 298 * Q_{N_2O}$ $= 25 * EF_1 * S_r$ $+ 298 * EF_2 * q_N$ $V_{ghg} = Q_{ghg} * C_{CO_2} * X_g$	Q <sub>ghg</sub> : 农田生态系统排放温室气体转化为 CO <sub>2</sub> 的当量 (t/a); Q <sub>CH<sub>4</sub></sub> 、Q <sub>N<sub>2</sub>O</sub> : 农田生态系统排放 CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O 的量 (t/a), 25 和 298 表示甲烷和氧化亚氮相对于 CO <sub>2</sub> 的全球变暖潜势 <sup>a</sup> ; EF <sub>1</sub> 、EF <sub>2</sub> : 稻田的甲烷排放因子 (kg/hm <sup>2</sup> )、农用地的 N <sub>2</sub> O 排放因子 (kg/kg); q <sub>N</sub> : 各排放过程氮输入量 (kg); V <sub>ghg</sub> : 农田生态系统排放温室气体的负面价值 (元/a); X <sub>g</sub> : 单位转换系数
农用化学 品污染	化肥/农药: $V_p=q_p*(1-r_p)*P_p$	V <sub>p</sub> : 化肥或农药造成的负面价值 (元/a); q <sub>p</sub> : 化肥或农药的用量 (kg/a); r <sub>p</sub> : 化肥或农药的利用率 (%); P <sub>p</sub> : 化肥或农药的市场价格 (元/kg); t <sub>p</sub> : 化肥或农药
	地膜: $V_{mf}=S_{mf}*t_{mf}*q_{mf}*r_{mf}*P_f$	V <sub>mf</sub> : 地膜造成的负面价值 (元/a); S <sub>mf</sub> : 地膜覆盖面积 (hm <sup>2</sup> /a); t <sub>mf</sub> : 地膜残留比例 (%); q <sub>mf</sub> : 使用地膜的作物单位面积产量 (kg/hm <sup>2</sup> ); r <sub>mf</sub> : 地膜残留造成的粮食损失率 (%); P <sub>f</sub> : 生长需要地膜的农产品均价 (元/kg)

注: a代表数据来自于《省级温室气体清单编制指南(试行)》。

农田生态系统的负面价值包括农业水资源过度消耗、温室气体排放和农用化学品（化肥、农药、地膜）污染三个方面。第一，由于农业灌溉措施的实施，农田生态系统的生产力大大提升，但大面积的低效率农业灌溉也导致了资源环境问题，包括华北地区的地下水漏斗等<sup>[36]</sup>。由农业用水量乘以水价来核算水资源消耗的负面价值。第二，根据《省级温室气体清单编制指南（试行）》知，省级农田生态系统温室气体清单主要包括稻田排放的 CH<sub>4</sub> 和农用地排放的 N<sub>2</sub>O。采用增温潜势将相同质量的 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 气体换算为等温室效应的 CO<sub>2</sub> 的量，然后再根据碳排放交易价格进行价值核算<sup>[10]</sup>，即为农田生态系统温室气体排放对气候造成的负面价值。第三，农作物的增产在很大程度上依赖农用化学品（化肥、农药及农膜）的使用，但这些农用化学品也带来了一系列环境问题。化肥的过量使用和利用率低下造成水体富营养化、空气污染等；农药残留会降低粮食的品质、危害人类健康等。因目前计算养分进入水体、粮食品质降低等负面价值缺乏参考文献，采用流失价值来表征二者带来的负面价值<sup>[28, 36]</sup>。另外，残留的农用地膜会危害土壤环境，如影响土壤水分渗透和土壤透气，造成作物减产，由此核算残留地膜的负面价值<sup>[30, 36]</sup>。

### 3 应用研究

基于本研究构建的农田生态系统服务价值核算指标体系和归纳的核算方法，选取我国粮食第一大省——黑龙江省作为研究案例。因部分核算指标的数据需来源于统计年鉴，目前其最新的年份为 2020 年，即最新可得的数据为 2019 年的，且本文设计研究跨 10 年、20 年的农田生态系统服务的动态变化。另外，为了避免由 PPI 指数、CPI 指数等折算出核算年份价格导致核算结果错误，有核算年份价格的就核算农田生态系统服务的功能量和价值量，没有核算年份价格的仅核算功能量。因此，本文主要核算 1999 年、2009 年、2019 年这 3 个年份黑龙江省农田生态系统服务的功能量和 2019 年服务总价值，以期检验构建的指标体系，为今后的核算研究和相关政策提供依据。

#### 3.1 数据来源

##### 3.1.1 调节服务数据来源

核算涵养水源服务时，1999 年、2009 年、2019 年黑龙江省年均降水量从对应年份的《黑龙江统计年鉴》上得到。产流降水量占降水总量之比取 0.4<sup>[37]</sup>；产流降水条件下农田与裸地降水径流率之差取 0.2<sup>[30, 37]</sup>；稻田淹水期土壤水分的入渗率取 6 mm/d<sup>[32]</sup>。该省稻田淹水期天数经调研得到，年均均为 60~70 天。2019 年该省水的市场价格由 2019 年该省农业、工业、生活三类的用水量<sup>①</sup>和分别对应的价格（2019 年工业水价为 4.98 元/m<sup>3</sup>，城镇生活用水为 2.6 元/m<sup>3</sup>，农业水价为 0.03 元/m<sup>3</sup>）<sup>②</sup>求得加权价格，为 0.472 元/m<sup>3</sup>。核算洪水调蓄服务时，经调研得黑龙江省稻田田埂的平均高度为 30~40 cm，夏季稻田日常平均水深为 5~10 cm。由黑龙江省近几年部分水库单位库容工程造价求均值，可得水库造价为 12.28 元/m<sup>3</sup>，按照建设完成后的水库使用年限为 50 年算，得到 2019 年水库蓄水成本为 0.29 元/m<sup>3</sup>。

核算水土保持服务时，黑龙江省裸地土壤侵蚀模数和农田生态系统土壤侵蚀模数参照孙禹等<sup>[38]</sup>、王美玉等<sup>[39]</sup>对黑龙江省水土流失的研究。按照我国流域泥沙运动规律，一般土壤侵蚀流失的泥沙大部分会滞留和入海，另外有 24%淤积于水库、江河、湖泊，需要清淤，因此 λ 取值 24%<sup>[7, 34]</sup>。根据韩光中等<sup>[40]</sup>对黑龙江省 408 个土壤样本的研究得，土壤容重的均值为 1.29 g/cm<sup>3</sup>。经调研得，2019 年黑龙江省水库单位库容清淤工程费用为 15 元/m<sup>3</sup>。

核算固碳服务时，黑龙江省 3 个年份各种农作物的产量来自《黑龙江统计年鉴 2020》，对应农产品的含水

<sup>①</sup>数据来源：国家统计局—国家数据，<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103&zb=A0C04&reg=230000&sj=2020>。

<sup>②</sup>经调研和官方数据得到。

量参考 Lobell 等<sup>[41]</sup>、白杨等<sup>[42]</sup>的研究, 农作物的收获指数参考 Lobell 等<sup>[41]</sup>、张福春和朱志辉<sup>[43]</sup>、谢光辉等<sup>[44-45]</sup>的研究。农产品含水量、作物收获指数及经计算得到的 NPP 见表 4。2019 年固碳价格采用 2021 年 7 月全国碳排放权交易市场上线交易以来的平均交易价格(配额累计成交额/累计成交量)<sup>①</sup>, 为 44.54 元/t。核算释氧服务时, 黑龙江省 2019 年氧气价格由氧气平均价格<sup>②</sup>经黑龙江省工业生产者出厂价格指数(即 PPI 指数)<sup>③</sup>转化得到, 为 853 元/t。核算空气净化服务时, 参照马新辉等<sup>[46]</sup>、刘利花等<sup>[32]</sup>的研究得到农田生态系统吸收 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和吸附粉尘的平均通量。据《黑龙江省人民代表大会常务委员会关于环境保护税黑龙江省应税大气污染物水污染物适用税额和同一排放口应税污染物项目数的决定》<sup>④</sup>的规定, 黑龙江省应税大气污染物适用税额为每污染当量 1.2 元。

表 4 黑龙江省农田生态系统净初级生产力计算

作物种类	作物亚类	含水率	收获指数	净初级生产力/万吨		
				1999 年	2009 年	2019 年
粮食	谷物	0.133	0.400	5 472.50	8 800.97	14 420.33
	豆类	0.133	0.400	1 027.61	1 388.30	1 727.45
	薯类	0.800	0.500	30.28	35.17	21.22
油料		0.090	0.255	140.25	100.48	41.17
麻类		0.133	0.356	36.04	10.89	30.09
甜菜		0.850	0.600	50.90	27.50	10.41
烟叶		0.082	0.610	16.86	12.48	3.90
蔬菜、食用菌		0.825	0.900	207.78	122.70	114.70
瓜果类		0.775	0.900	55.48	56.41	32.95
NPP				7 037.69	10 554.91	16 402.22

### 3.1.2 其他数据来源

黑龙江省农田生态系统供给服务的核算依据《中国农村统计年鉴》(2000、2010、2020 年)和《黑龙江统计年鉴 2020》中的数据。

核算社会保障服务时, 1999 年黑龙江省农村地区农业从业人员由《黑龙江统计年鉴》(2000、2010、2020 年)得到。因 1999 年我国农村还没有实行最低生活保障政策, 该年黑龙江省农村最低生活保障标准由农村与城市居民的生活消费开支比估算得到, 为每人每年 705 元; 2009 年数据由政府工作报告中获得, 为每人每年 1 100 元<sup>⑤</sup>; 2019 年数据由省政府文件中获得, 为每人每年 3 500 元。另一方面, 粮食安全的统计口径是谷物, 而非所有的农产品。为强化区域粮食安全并按照《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020 年)》的要求, 本研究采用 100%的粮食自给率。人均粮食需求量按世界粮农组织(FAO)公布的粮食安全线年人均 400 千克为

<sup>①</sup>数据来源:《全国碳排放权交易市场配额累计成交额突破 10 亿元》, [http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202111/t20211112\\_960045.shtml](http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202111/t20211112_960045.shtml)。

<sup>②</sup>数据来源:国家林业局,《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)。

<sup>③</sup>数据来源:国家统计局—国家数据, <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103&zb=A0908&reg=230000&sj=2020>。

<sup>④</sup>数据来源:《黑龙江省人民代表大会常务委员会关于环境保护税黑龙江省应税大气污染物水污染物适用税额和同一排放口应税污染物项目数的决定》, <https://www.hlj.gov.cn/n200/2018/0101/c313-10858545.html>。

<sup>⑤</sup>数据来源:《2009 年黑龙江省人民政府工作报告》, [http://www.gov.cn/test/2009-02/12/content\\_1228759.htm](http://www.gov.cn/test/2009-02/12/content_1228759.htm)。

准。

除此，2019年黑龙江省旅游总收入为2 683.8亿元，旅游主打冰雪游、湿地游、避暑游、自驾游、森林游等“冰爽系”名牌。农田生态系统也有休闲旅游价值，但在该省总的旅游价值中占比较小，且缺乏相关统计数据，不予核算。

核算2019年黑龙江省农田生态系统负面价值中，对于水资源消耗，由《中国水利统计年鉴2020》中黑龙江省耕地实际灌溉亩均用水量与耕地实际灌溉面积相乘得到农业用水量。对于温室气体排放，因黑龙江省大部分农户存在有机肥施用意愿与行为背离<sup>①</sup>，仅少数农户使用有机肥，则黑龙江农用地中N<sub>2</sub>O的直接排放来源为农用化肥和秸秆还田。其中，农用化肥使用量来自《中国农村统计年鉴2020》；由水稻、玉米、大豆三种农作物的产量转化得到秸秆氮输入量，且秸秆还田率为55%<sup>②</sup>，秸秆含氮量、根冠比、稻田排放CH<sub>4</sub>因子、农用地排放N<sub>2</sub>O的直接和间接排放因子均来自《省级温室气体清单编制指南（试行）》。对于农用化学品污染，化肥、农药使用量来自《中国农村统计年鉴2020》，两者利用率分别为39.2%和39.8%<sup>③</sup>。黑龙江省种植面积大的作物是玉米、大豆和水稻，其中，仅水稻的育秧用到农膜且几乎全回收，其余种植均不用农膜；有些蔬菜、瓜果等用农膜，按因种植面积小且生产后多会将其堆到一旁，影响可忽略。

## 3.2 20年间服务动态变化

### 3.2.1 供给服务变化

1999年黑龙江省种植业总产值为450.1亿元，总产量为4 752.70万吨，其中谷物产量最高，其次为蔬菜和食用菌；全省农作物播种总面积为915.80万公顷。2009年黑龙江省农业总产值为1 206.8亿元，比1999年增加756.7亿元。其中，谷物及其他作物产值最高，为976.3亿元；总产量为5 866.56万吨，其中，谷物比10年前增加1 500多万吨，但蔬菜和食用菌下降486.18万吨。2019年黑龙江省农业总产值为3 774.5亿元，其中，谷物及其他作物产值最高。总产量为8 358.32万吨，其中，谷物总产量第一；谷物中，玉米、水稻、大豆产量位居前三。

1999—2009年，由于黑龙江省农田种植面积增加，供给服务功能量增加75.86%，价值量由450.1亿元增加到1206.8亿元，价值量翻了8.39倍。20年间黑龙江省农产品播种面积由915.80万公顷增加到1 471.88万公顷，增加了60.72%；虽然2009—2019年粮食播种面积增加的比例仅为18.28%，但由于农作物品种的改良和种植技术的提升，这10年间粮食产量翻了1.57倍。

### 3.2.2 社会保障服务变化

核算结果表明（表5），1999—2019年黑龙江省农田生态系统社会保障服务价值由230.16亿元增加到4 716.89亿元，保障粮食安全的价值增幅很大。20年间，保障就业价值由52.5亿元增加至208.39亿元，增长了292.92%。1999年，黑龙江省农田生态系统保障农村居民就业人数为744.7万人，社会保障服务价值为52.50亿元；由于城市化进程的演进，2009年农村居民就业人数下降至684.4万人；2019年农村居民就业人数进一步下降至595.4万人，但因农村最低生活保障标准提升至2009年的3.18倍，保障就业的价值较2009年增长176.81%。另一方面，由于谷物产量大幅度增长及最低生活保障标准的提升，保障粮食安全价值在20年间翻了25.38倍，尤其是在近10年增长迅速，由695.76亿元增长到4 508.50亿元。

<sup>①</sup>数据来源：《〈2019年黑龙江省秸秆综合利用工作实施方案〉政策解读》，<https://www.hlj.gov.cn/n200/2019/1129/c627-446907.html>。

<sup>②</sup>数据来源：《农业农村部：我国化肥农药利用率正稳步提高》，<http://country.people.com.cn/n1/2019/1218/c419842-31512429.html>。

### 3.2.3 调节服务变化

核算结果表明（表 5），1999—2019 年，黑龙江省农田生态系统各项调节服务的功能量均呈递增趋势，平均增长率为 112.34%，后 10 年的平均增长率为 36.11%。

1999 年黑龙江省农田生态系统涵养水源的功能量为 93.87 亿 m<sup>3</sup>；2009 年增加到 172.22 亿 m<sup>3</sup>，增加率为 83.47%；2019 年增加到 233.65 亿 m<sup>3</sup>，涵养水源服务的价值为 109.81 亿元。洪水调蓄的功能量均小于对应年份的涵养水源功能量。土壤保持的功能量从 1999 年的 1.07 亿吨增加到 2019 年的 1.71 亿吨。3 项气体调节服务中，空气净化的功能量最大，从 1999 年的 3.13 亿吨增加到 2019 年的 5.03 亿吨，2019 年空气净化服务的价值为 1 518.96 亿元；其次是释氧，2019 年释氧量为 1.95 亿吨，价值量为 1 664.94 亿元，是调节服务价值中最高的。

从功能量的变化率上来看，20 年间涵养水源增长率最高，为 148.92%。其次，洪水调蓄、固碳、释氧的增长率在 132.14%~136.07%之间。土壤保持和空气净化两项服务的增加率最小，均为 60.72%。对比各项调节服务前后 10 年间的功能量变化，涵养水源、洪水调蓄、土壤保持、空气净化 4 项服务前 10 年的功能量变化率均高于后 10 年，其中涵养水源变化率相差 47.8%，是由于前 10 年黑龙江省年均降水量的增量高于后 10 年；固碳、释氧的增长率相当，均在 50%~55.32%之间。

除此，黑龙江省农田生态系统防风固沙、气候调节服务未予核算。因为黑龙江省大风天气多出现在春、秋两季，冬季多冻融<sup>[48]</sup>；农作物春季播种时，防风固沙能力尚小，秋季农作物收割，仅具有 1~2 个月防风固沙作用，服务价值小且不易核算，因此暂不予核算。另外，依据《规范》（DB33/T 2274—2020）<sup>[8]</sup>知，当气温大于 26℃时才需要采取降温措施，而黑龙江省夏季平均温度小于 26℃，因此不核算气候调节服务。

表 5 1999—2019 年黑龙江省农田生态系统服务变化量

服务类别	核算科目	1999 年	2009 年	2019 年		2009—2019 年		1999—2019 年	
		价值量/ 亿元	价值量/ 亿元	—	价值量/ 亿元	价值变化 量/亿元	价值变化率 /%	价值变化 量/亿元	价值变化 率/%
社会保障 服务	保障就业	52.50	75.28	—	208.39	133.11	176.81	155.89	296.92
	保障粮食安全	177.66	695.76	—	4 508.50	3 812.75	548.00	4 330.84	2437.72
服务类别	核算科目	功能量	功能量	功能量	价值量/ 亿元	功能量变 化量	功能量变化 率/%	功能量变 化量	功能量变 化率/%
供给服务	供给产品/(万 t/a)	4 752.70	5 866.56	8 358.32	3 774.50	2 491.76	42.47	3 605.62	75.86
调节服务	涵养水源/(亿 m <sup>3</sup> /a)	93.87	172.22	233.65	109.81	61.43	35.67	139.78	148.92
	洪水调蓄/(亿 m <sup>3</sup> /a)	39.08	65.23	92.26	26.76	27.04	41.45	53.18	136.07
	土壤保持/(亿 t/a)	1.07	1.49	1.71	4.78	0.22	14.74	0.65	60.72
	固碳/(亿 t/a)	0.31	0.47	0.73	32.51	0.26	55.32	0.42	135.48
	释氧/(亿 t/a)	0.84	1.26	1.95	1 664.94	0.69	54.76	1.11	132.14
	空气净化/(亿 t/a)	3.13	4.38	5.03	1 518.96	0.65	14.74	1.90	60.72
正面价值 合计					11 849.15				

### 3.3 2019 年核算结果与讨论

黑龙江省农田生态系统服务价值核算结果表明（图 2），2019 年黑龙江省农田生态系统服务总价值为 11 667.01 亿元，是农产品供给价值的 3.09 倍，相当于当年该省 GDP 的 85.71%，不容忽视。其中，保障粮食安全价值最大（4 508.50 亿元），其次是供给产品价值（3 774.50 亿元）。农田生态系统调节服务占总服务价值的比为 28.34%，其中，释氧价值和空气净化价值均超过 1 500 亿元。除此，负面价值相对于正面总价值很小，其中，水资源消耗最大（125.58 亿元），其次是农用化学品污染。

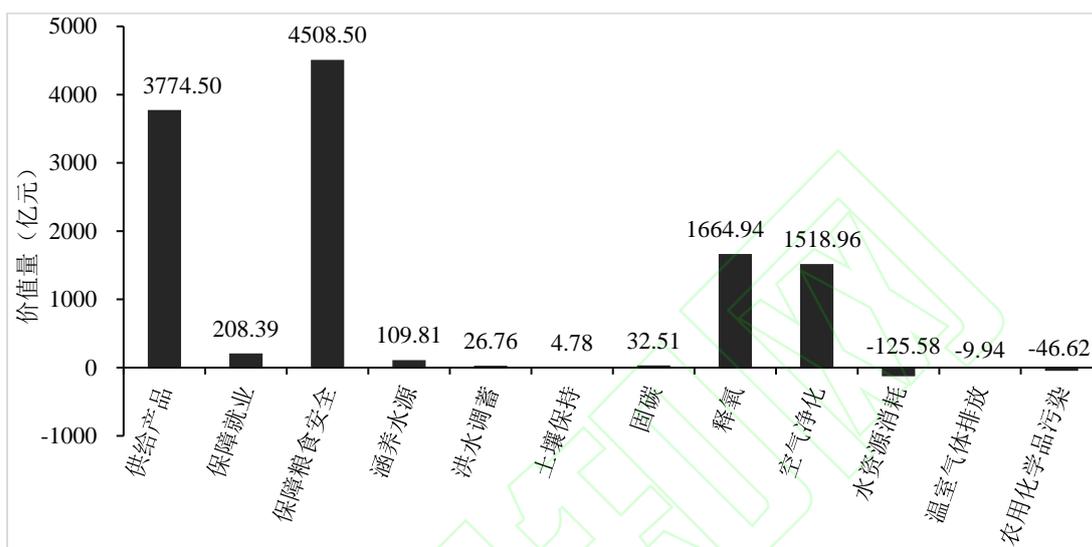


图 2 2019 年黑龙江省农田生态系统服务价值组成

对比其他研究结果发现（表 6），本研究核算结果与经调整<sup>①</sup>后的其他农田生态系统服务价值评估研究的结果相近，与 GEP 的核算结果区别大，中间服务造成结果偏大 1.65%~76.98%。在有限的 10 项关于或包含农田生态系统服务核算研究中，其中就 6 项研究中包含中间服务价值；核算了保障就业价值、负面价值的研究均为 2 项。

先找出 6 项研究中的中间服务，核算积累营养物质、生物多样性服务价值的最多，予以剔除；因为核算负面价值的研究仅 2 项，为了保证可比性，对其中的负面价值也进行剔除。经这两步调整后对比发现，与本文结果相近，多数农田生态系统服务价值中，供给服务占比高，其次是调节服务，且二者占比相差不大。同时，将 5 篇文献结果中的农田生态系统单位面积服务价值由 PPI 指数折算为 2019 年的价值，为 3.95~10.41 万元/hm<sup>2②</sup>，本研究的结果是 8.05 万元/hm<sup>2</sup>，在此范围内。而 3 篇核算 GEP 的文献中，调节服务价值占比最大，其次是文化服务和供给服务，调节服务是供给服务的 3~13 倍，与农田生态系统服务中的占比相差大。除此，核算了中间服务的研究会造成结果会偏大 1.65%~76.98%，需引起重视。由此证明，本研究构建的指标体系及应用结果可靠，农田生态系统服务价值核算不能照搬 GEP 等的核算指标，且中间服务在核算中需剔除。

<sup>①</sup>当研究中核算了中间服务价值、负面价值时，予以减去。

<sup>②</sup>由于谢高地研究中的单位面积农田生态系统服务价值的评估结果与其他文献均相差太大，故不比较。

表 6 本研究结果与其他研究结果对比

文献来源	研究区域	核算年份	农田生态系统服务正面总价值/亿元 <sup>a</sup>	不同服务价值占比/%	转换为2019年单位面积正面价值/(元/hm <sup>2</sup> )	中间服务类别	中间服务造成结果偏大程度/%
本研究	黑龙江省	2019	11 849.15	供给服务 31.85, 调节服务 28.34, 社会保障 39.81 <sup>b</sup>	80 503.53	—	—
孙新章等 <sup>[10]#</sup>	中国	2003	22 334.10	供给服务 66.58, 保障就业 3.41, 调节服务 30.01	39 524.42	—	—
张东等 <sup>[49]*</sup>	河北省 怀来县	2012	22.53	供给服务 53.09, 调节服务 9.10, 文化服务 37.03	—	积累营养物质、生物多样性保护	1.65
周镛基等 <sup>[50]*</sup>	湖南省	2014	2 229.36	供给服务 90.64, 调节服务 9.36	51 361.12	积累营养物质	2.82
孔凡靖等 <sup>[30]*#</sup>	重庆市	2016	2 172.43	供给服务 53.02, 调节服务 46.98	99 280.50	授粉、积累营养物质、生物多样性保护	3.88
Cai 等 <sup>[35]</sup>	青岛市	2017	681.74	供给服务 56.01, 保障就业 2.24, 调节服务 41.68, 文化服务 0.08	104 147.98	—	—
依据谢高地等 <sup>[17]*</sup> 当量因子计算得	黑龙江省	2007	—	供给服务 25.69, 调节服务 71.16, 文化服务 3.14	2 838.93	生物多样性保护	14.83
GEP 或多种生态系统服务价值核算结果							
欧阳志云等 <sup>[7]</sup>	贵州省	2010	20 013.46	供给服务 10.41, 调节服务 68.92, 文化服务 20.67	—	—	—

Ouyang 等 <sup>[2]</sup>	青海省	2015	786 <sup>d</sup>	供给服务 16.67, 调节服务 55.85, 文化服务 27.48	—	—	—
牟雪洁等 <sup>[34]*</sup>	延庆区	2016	189.64	供给服务 6.77, 调节服务 84.76, 文化服务 8.47	81 894.77 (农田)	生物多样性保护	76.98 (农田)
北京市都市型现代农业生态系统服务价值检测公报 <sup>*e</sup>	北京市	2019	3 895.32	—	—	土壤形成、生物多样性保护	21.46

注: \*代表该研究核算了中间服务价值, #代表该研究核算了负面价值。上角标 a 表示当研究中核算了中间服务价值、负面价值时, 予以减去; b 表示本研究中的社会保障服务包括保障就业和粮食安全两部分; c 表示该研究中的调节服务仅包含固碳释氧、土壤保持、营养物质保持 3 项; d 表示为了保证研究结果间的可比性, 减去供给水的价值; e 表示参见: 《2019 年北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》, [http://tj.beijing.gov.cn/tjsj\\_31433/tjgb\\_31445/stgb\\_31450/202005/t20200528\\_1910052.html](http://tj.beijing.gov.cn/tjsj_31433/tjgb_31445/stgb_31450/202005/t20200528_1910052.html)。

#### 4 结论与启示

本研究基于对国内外经典生态系统服务价值核算理论的分析, 结合农田生态系统自身的特点, 提出了一套准确的农田生态系统服务价值核算指标体系。首先, 在生态系统服务的大类型中增加了社会保障服务, 调节服务中的涵养水源、洪水调蓄所包含的内容、核算方法与其他生态系统服务也有较大区别。第二, 不核算授粉、土壤形成、积累营养物质、生物多样性保护 4 项中间服务的价值, 以避免重复计算。第三, 农田作为重要的人工生态系统, 在生产过程对资源环境造成的负面影响也要核算。由此本文构建了一套准确的农田生态系统服务价值核算指标体系, 具体包括供给、社会保障、调节、文化服务四大类 12 项二级指标和 3 项负面价值指标。

应用研究表明, 2019 年黑龙江省农田生态系统服务总价值为 11 667.01 亿元, 是农产品供给价值的 3.09 倍, 相当于当年该省 GDP 的 85.71%, 不容忽视。其中, 保障粮食安全价值最大, 供给产品价值其次; 调节服务中, 释氧和空气净化价值均超过 1 500 亿元。除此, 负面价值相对于正面总价值很小, 其中, 水资源消耗最大, 其次是农用化学品污染。从 1999—2019 年动态变化量来看, 供给服务的功能量增加 75.86%, 价值量翻了 8.39 倍; 社会保障服务价值增幅很大, 尤其是保障粮食安全价值在 20 年间翻了 25.38 倍; 各项调节服务功能量的平均增长率为 112.34%。对比其他研究结果表明, 本研究构建的指标体系及应用研究结果可靠, 剔除中间服务价值可纠正 1.65%~76.98% 的偏差, 为农田生态系统服务价值核算研究及相关政策提供了重要依据。

基于以上结论, 本文提出如下政策启示。一是农田是重要的人工生态系统, 具有自身的特殊性, 尤其是在社会保障服务、稻田的涵养水源和洪水调蓄服务及负面价值上, 因此, 建立准确的农田生态系统服务价值核算指标体系非常必要, 而非按照其他生态系统的核算指标。二是通过准确核算出农田生态系统服务价值来揭示出其除供给服务外的社会保障、调节等服务带来的福利, 为生态产品价值实现、耕地生态补偿政策优化

提供重要依据。尤其是在高度重视粮食主产区的粮食生产安全的同时，落实耕地生态补偿政策，纠正主产区在土地发展权受限的情况下为其他省份提供粮食安全保障的正外部性，从而提高主产区政府抓粮生产、农民种粮的积极性，牢牢保障我国的粮食安全。

#### 参考文献:

- [1]Costanza R, d' Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [2]Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 2020, 117(25): 14593-14601.
- [3]Bai Y, Wong C P, Jiang B, et al. Developing China's ecological redline policy using ecosystem services assessments for land use planning [J]. Nature Communications, 2018(9): 1-13.
- [4]联合国, 欧洲联盟, 联合国粮食及农业组织, 等. 环境经济核算体系 2012 中心框架[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [5]United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization, et al. System of Environmental-economic Accounting 2012: Experimental Ecosystem Accounting (EEA) [M]. New York: United Nations, 2014.
- [6]千年生态系统评估项目概念框架工作组 (MA). 生态系统与人类福祉: 评估框架[M]. 张永民, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [7]欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013 (21): 6747-6761.
- [8]浙江省市场监督管理局. 《生态系统生产总值 (GEP) 核算技术规范——陆域生态系统》(DB33/T 2274—2020) [S]. 2020.
- [9]王金南, 於方, 马国霞, 等. 规范生态系统价值核算 助力生态产品价值实现——解读《陆地生态系统生产总值核算技术指南》[N]. 中国环境报, 2020-10-12 (3).
- [10]孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值[J]. 中国人口·资源与环境, 2007 (4): 55-60.
- [11]黄季焜. 对近期与中长期中国粮食安全的再认识[J]. 农业经济问题, 2021 (1): 19-26.
- [12]崔宁波, 董晋. 主产区粮食生产安全: 地位、挑战与保障路径[J]. 农业经济问题, 2021 (7): 130-144.
- [13]毛学峰, 刘靖, 朱信凯. 中国粮食结构与粮食安全: 基于粮食流通贸易的视角[J]. 管理世界, 2015 (3): 76-85.
- [14]杜志雄, 高鸣, 韩磊. 供给侧进端口变化对中国粮食安全的影响研究[J]. 中国农村经济, 2021 (1): 15-30.
- [15]罗必良. 增长、转型与生态化发展——从产品性农业到功能性农业[J]. 学术月刊, 2021 (5): 54-64.
- [16]Costanza R, de Groot R, Sutton P. Changes in the global value of ecosystem services Global [J]. Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [17]谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008 (5): 911-919.
- [18]Cao Y N, Kong L Q, Zhang L F, et al. The balance between economic development and ecosystem service value in the process of land urbanization: A case study of China's land urbanization from 2000 to 2015 [J]. Land Use Policy, 2021, 108: 1-12.
- [19]Fisher B, Turner R K. Ecosystem services: classification for valuation [J]. Biological Conservation, 2008, 14: 1167-1169.
- [20]Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [21]Fisher B, Turner R K, Morling P, et al. Defining and classifying ecosystem services for decision making [J]. Ecological

- Economics, 2009, 68(3): 643-653.
- [22]Fisher B, Turner, K, Zylstra M, et al. Ecosystem services and economic theory: integration for policy-relevant research [J]. Ecological Applications, 2008, 18(8): 2050-2067.
- [23]Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units [J]. Ecological Economics, 2007, 63: 616-626.
- [24]Costanza R, de Groot R, Braat L. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.
- [25]繆建群, 杨文亭, 杨滨娟, 等. 崇义客家梯田生态系统服务功能及价值评估[J]. 自然资源学报, 2016 (11): 1817-1831.
- [26]国务院新闻办公室. 中国的粮食安全[M]. 北京: 人民出版社, 2019
- [27]曹瑞芬, 张安录. 耕地保护补偿标准及跨区域财政转移机制——基于地方政府经济福利视角的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015 (10): 132-138.
- [28]刘利花, 张丙昕, 刘向华. 粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J]. 农业工程学报, 2020 (19): 252-263.
- [29]苏浩, 吴次芳. 基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析——以黑龙江省克山县为例 [J]. 中国土地科学, 2020 (9): 77-85.
- [30]孔凡靖, 陈玉成, 陈庆华, 等. 重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019 (11): 1637-1648.
- [31]宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例[J]. 生态学报, 2020 (10): 3207-3217.
- [32]刘利花, 尹昌斌, 钱小平. 稻田资源价值体系构建及价值评估——以南京市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2015 (2): 29-37.
- [33]国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020) [S]. 2020.
- [34]牟雪洁, 王夏晖, 张箫, 等. 北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化[J]. 水土保持研究, 2020 (1): 265-274, 282.
- [35]Cai S Z, Zhang X L, Cao Y H, et al. Values of the farmland ecosystem services of Qingdao city, China, and their changes [J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(5): 443-453.
- [36]刘利花, 杨彬如. 中国省域耕地生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019 (2): 52-62.
- [37]刘小丹, 赵忠宝, 李克国. 河北北戴河区农田生态系统服务功能价值测算研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017 (4): 390-396.
- [38]孙禹, 哈斯额尔敦, 社会石. 基于 GIS 的东北黑土区土壤侵蚀模数计算[J]. 中国水土保持科学, 2015 (1): 1-7.
- [39]王美玉, 戴长雷, 张凯文, 等. 区域水土保持水土流失预测分析及实例研究[J]. 中国农学通报, 2021 (14): 72-77.
- [40]韩光中, 李秀芝. 黑龙江省土壤容重传递函数研究[J]. 内江师范学院学报, 2014 (2): 53-55.
- [41]Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-98 [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 722-735.
- [42]白杨, 欧阳志云, 郑华, 等. 海河流域农田生态系统环境损益分析[J]. 应用生态学报, 2010 (11): 2938-2945.

- [43]张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. 中国农业科学, 1990 (2): 83-87.
- [44]谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011 (1): 1-8.
- [45]谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011 (1): 9-17.
- [46]马新辉, 孙根年, 任志远. 西安市植被净化大气物质量的测定及其价值评价[J]. 干旱区资源与环境, 2002 (4): 83-86.
- [47]许佳彬, 王洋, 李翠霞. 农户有机肥施用意愿与行为悖离原因何在——基于对黑龙江省的调查[J]. 农业现代化研究, 2021 (3): 474-485.
- [48]桑琦明, 郑粉莉, 王一菲, 等. 东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2021 (2): 87-95.
- [49]张东, 李晓赛, 陈亚恒. 怀来县农田生态系统服务价值分类评估[J]. 水土保持研究, 2016 (1): 234-239.
- [50]周镡基, 吴思斌, 皮修平. 农业生产正外部性环境价值评估及其提升研究——以湖南省为例[J]. 农业现代化研究, 2017 (3): 383-388.

(责任编辑: 冯胜军)