

引用格式: 牟若彤, 吴良. 全球粮食产后收获损失研究综述[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1789-1800. [Mu R T, Wu L. A research review of global grain harvest losses[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1789-1800.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.07

全球粮食产后收获损失研究综述

牟若彤^{1,2}, 吴良¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】由于经济和技术水平等方面因素影响, 全球粮食产后不同阶段的损失差异巨大。了解世界各地粮食产后损失程度及影响因素, 可以为中国减少粮食损失提供关键信息参考。【方法】本文聚焦于粮食产后收获环节, 根据PRISMA指南, 以Web of Science数据库作为主要文献来源进行检索, 最终筛选出了98篇相关文献进行分析。【结果】①世界范围内, 学界对粮食产后收获损失的关注总体呈上升趋势, 但主要集中于亚洲和美洲国家, 文献报告的粮食作物总体产后平均收获损失率的均值为6.65%, 且因人工、机械、气候和种植管理等因素, 不同国家在粮食收获损失方面存在异质性。②农业产后收获的机械化发展虽然提高了收获效率, 但在发展中国家, 由于社会化服务发展产生的委托等问题对收获损失的影响不容忽视, 缺乏对联合收割机装备和性能的了解, 也限制了发展中国家机械化技术的应用和推广。③此外, 干燥与储存阶段设备的缺乏也会增加收获后损失。【结论】因此, 对中国而言, 在加大机械化收获应用力度的同时, 应根据国内经济条件和产业发展需要, 重视对机械收获技术、操作方法等的深入研究和应用, 持续更新、修订新的技术标准, 并完善农业产后收获的基础设施环境。本文可以为中国粮食收获阶段减损干预措施的提出提供信息和决策参考。

关键词: 产后损失; 收获损失; 影响因素; meta分析; PRISMA指南

DOI: 10.18402/resci.2023.09.07

1 引言

进入21世纪后, 人口的增长和饮食的改变正在对世界范围内的农业土地施加越来越多的压力^[1], 近年来, 受新冠肺炎疫情、俄乌冲突和贸易保护主义抬头等的影响^[2], 全球粮食安全形势更加严峻^[3]: 一方面, 粮食生产增长停滞, 特别是科技因素导致的粮食增产潜力有限; 另一方面, 粮食损失和浪费情况非常突出^[4]。据估计, 全球供应链环节的食物损失^①约占总产量的14%, 造成了大量食物资源的无意义消耗和温室气体的排放^[4]。

减少食物损失和浪费是保障粮食安全的重要途径^[3], 是实现全球可持续发展和构建人类命运共同体的重要手段。2011年联合国粮农组织(FAO)

发布了《全球食物损失和浪费: 程度、原因和预防》报告, 首次明确提出, 食物损失是指供应链前端环节中(不包括零售商、食品服务供应商和消费者)供人们食用的食物中可食用部分量的减少^[4]。2015年联合国将食物损失问题纳入可持续发展目标(SDG 12.3), 该目标旨在到2030年, 将全球零售和消费者层面的人均食物浪费减半, 并减少生产和供应链上的食物损失。许多国家(如英国、澳大利亚)也已开始将减少供应链环节的食物损失和浪费纳入政府议程。一些国家的政府机构和科研人员已开展了相关研究, 来推动社会各阶层的食物损失减量, 例如收集食物在具体阶段的损失信息、开展食物浪费基线评估以及制定食物浪费减量行动路线图等^②。综

收稿日期: 2023-03-22 修订日期: 2023-07-01

基金项目: 国家自然科学基金委员会管理学部应急管理项目(72241012)。

作者简介: 牟若彤, 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为粮食安全与可持续食物消费研究。E-mail: muruotong23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 吴良, 男, 湖南临湘人, 博士, 副研究员, 硕导, 研究方向为粮食安全与可持续食物消费研究。E-mail: wuliang@igsrr.ac.cn

① 根据FAO于2019年发布的报告, 食物在进入零售商和消费者手中之前, 会经历收获、干燥、储藏、运输、加工等阶段。

② FIAL, A Roadmap for reducing Australia's food waste by half by 2030. <https://www.dcccew.gov.au/environment/protection/waste/publications/roadmap-reducing-food-waste>。

合各方面进展来看,食物在不同环节产生的损失程度不同;相关损失在食物链上的分布还会因产品种类和所涉地理环境的不同而存在差异^[1,5,6]。虽然按百分比计算,水果和蔬菜等易腐食品的损失最高,但就数量和对弱势群体饮食的影响而言,大米等主食则更为严重^[7]。在发达国家,食物在零售和消费环节被浪费掉的比例更高,而在发展中国家,产后早期环节的食物损失问题则更为急迫^[8];食物损失对粮食安全和农村生计造成的显著影响也主要在发展中国家^[9]。因此,进一步明确食物损失发生的位置、程度和原因,是制定减少食物损失策略及应对措施,从而保障粮食安全的前提和关键。

收获期损失是全球范围内所有类型食物最常见的损失类型^[4]。2023年“三夏”季期间,河南等地出现的“烂场雨”就是种植过程都很顺利,但在收获前期出现连续降雨,导致小麦萌动和发芽,影响产量和品质,并最终形成食物重大损失的典型案例。本文聚焦于粮食产后收获这一阶段,旨在通过收集并梳理全球范围内有关水稻、玉米、小麦、大豆这4类粮食作物在产后收获阶段损失的相关研究,分析收获阶段这一关键损失点的粮食损失率及其影响因素,总结全球范围内国家(地区)的损失情况,从而为国内粮食产后减损提供指导与借鉴。本文的主要贡献有两点:一是基于Web of Science文献数据库,利用PRISMA分析法(Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)对现有研究进行系统整理,构建包含学术论文和研究报告等在内的、以4种粮食作物(水稻、玉米、小麦和大豆)为主体的国际粮食产后收获损失文献数据库;二是根据这个文献数据库,构建国际粮食作物损失率及损失因素数据集,并利用损失率这个统一的标准,提炼制定减少粮食损失干预措施所需的关键信息。

2 研究方法

为全面分析粮食产后收获阶段损失方面的文献,确保文献综述的结论有价值,本文借鉴了PRISMA指南,对现有文献进行了系统回顾^[10]。PRISMA是当今学界广泛使用的一套为确保系统综述和荟萃分析研究质量而设立的标准规范,它主要包括识别、去重、筛选和确定4个步骤。当需要总结一个主题的现有信息以便对一个特定现象做出结论时,

PRISMA是一个很好的选择^[10]。需说明的是,本文的主要目标是了解全球范围内的国家或粮食作物在产后收获阶段的损失情况,进而助力全球可持续发展目标(SDGs)的实现,并为国内提供全球产后收获阶段的粮食损失情况对比,因此有关中国粮食作物产后收获阶段损失的相关研究本文并没有全部纳入,只选择了部分相对重要的篇章进行分析。

为了尽可能覆盖全球粮食产后收获损失的相关文献及数据,本文以Web of Science数据库作为主要文献来源进行搜索(图1)。考虑到近年来一些学术机构、行业协会、政府和非政府组织也在开展相关工作,本文也对一些国际机构的报告和与之相关的“灰色文献”进行了梳理,并逐一检索了文章的参考文献,将研究内容与本文关注主题相关的文献纳入库中。在确立了最终需要评估的文献后,构建了粮食产后收获阶段损失的文献数据库。随后,对该库中的所有文献进行了仔细阅读,记录并整理了所有文献中涉及的粮食收获损失率及损失因素的信息,将粮食损失率数据进一步分为最小损失率、平均损失率和最大损失率3类,并对这些因素进行了荟萃分析与讨论。此外,考虑到不同大洲的粮食产后收获损失差别可能更多是由经济发展水平、农

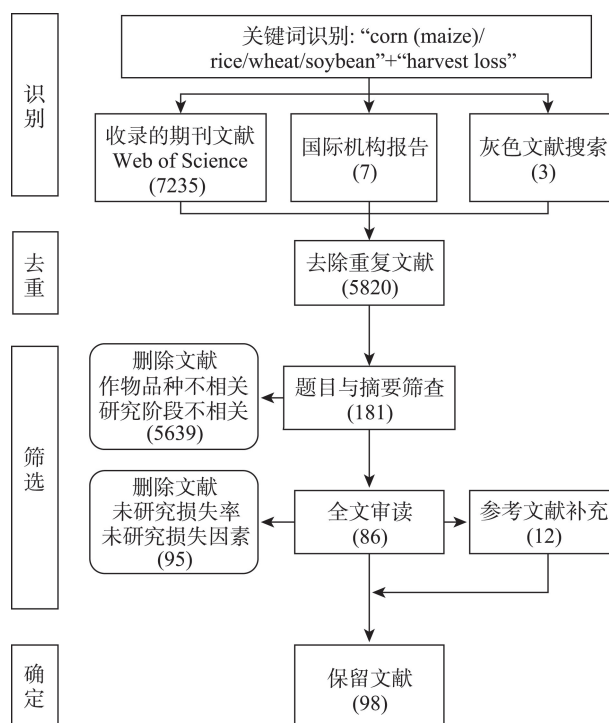


图1 PRISMA流程图

Figure 1 Flowchart of PRISMA

2023年9月

业产业化水平、贸易竞争力等因素导致,地理在其中可发挥的影响作用相对有限,本文将文献中提及具体平均损失率的国家筛选出来,利用各国2001—2020年的平均粮食贸易竞争力指数(TSC)与其对应的平均损失率进行了线性拟合。其中,粮食贸易竞争力指数采用如下公式进行计算:

$$TSC = \sum_{i=2001}^{2020} \frac{T_{exi} - T_{imi}}{T_{exi} + T_{imi}}$$

式中: T_{exi} 和 T_{imi} 分别表示第 i 年各国粮食进出口额。如 TSC 是正值,表明粮食出口竞争力大于进口竞争力;反之,如 TSC 是负值,则粮食出口竞争力小于进口竞争力。 TSC 越大,竞争力越大。粮食产量和贸易量数据源自联合国粮农组织数据库(FAO-STAT)。

3 结果与分析

3.1 文献检索结果

本文以2022年12月3日为截止日期,以“corn (maize)/rice/wheat/soybean”+ “harvest loss”为检索词,对1960年以来Web of Science文献数据库中收录的文献进行检索,分别检索出玉米相关文献2332篇、小麦2465篇、水稻1540篇、大豆898篇。对FAO、WRI等国际机构公开发表的文章或报告进行

查询,检索出7篇重要报告。此外,还通过Google Scholar等检索到了3篇灰色文献。文献检索完成后,先删去了其中重复的1425篇文献,保留了5820篇文献。接着以题目或摘要内容是否涉及大豆/小麦/玉米/水稻的产后收获阶段损失为标准进行初步筛查,删除与本文关注的损失阶段和损失作物品种不相关的文献5639篇,保留了181篇相关文献。随后,逐个审读保留文献的全文,进一步剔除研究内容与损失率或损失因素不相关的文献95篇,并在阅读过程中仔细筛查各文章的参考文献列表,纳入了12篇与粮食收获损失相关的参考文献,最终共保留98篇文献。其中,同时给出具体的收获损失率及影响因素的文献有77篇。

3.2 文献研究的区域分布

从产后损失研究所涉及的地域来看,本文建立的文献数据库所涉研究地区较为广泛,覆盖了美洲、亚洲、非洲、大洋洲和欧洲国家(地区)(图2)。将国家(地区)按照大洲进行分类并将涉及的文献篇数进行加总后,得到数据库中各文献对于不同大洲的涉及次数(图3),其中,学界对亚洲产后收获损失的关注度是最高的,提及了89次,其中大部分是东亚、南亚和东南亚国家(地区),即亚洲的主要粮

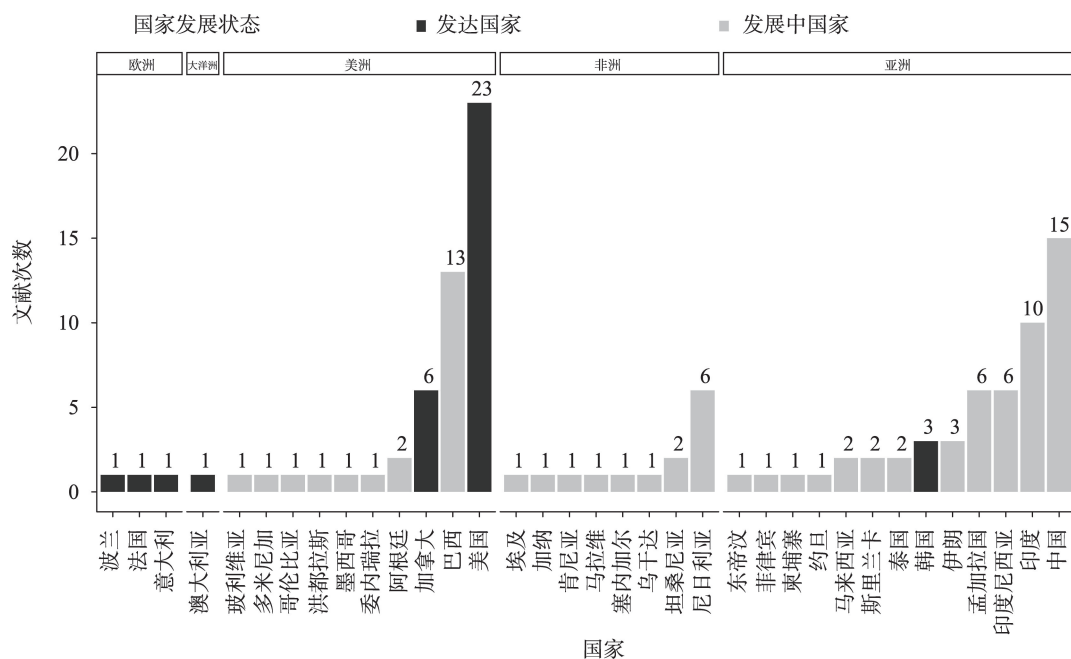


图2 不同国家在文献库中的被研究次数

Figure 2 The number of times that different countries were studied based on the publications in the database

注:中国粮食作物产后收获阶段损失相关文献的研究范围不含港澳台地区。

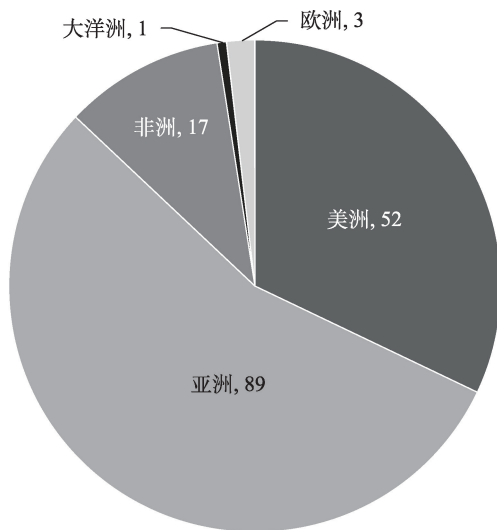


图3 不同大洲的粮食损失研究在文献库中的次数

Figure 3 The number of times that the four types of grains were studied and proportion by continent based on the publications in the database

食生产区;美洲产后收获损失的研究也相对丰富,主要聚焦于美国和巴西两大农业生产国;非洲的研究相对较少。保留文献的研究区域呈现一个主要特征,即研究发达国家收获损失的文献相对较少,且主要集中于美国,其余大部分都是发展中国家(地区)。

从文献中所涉及的粮食作物种类来看,受关注较多的是水稻,其次是玉米和大豆,小麦收获损失的关注度较少(图4)。亚洲是世界主要的水稻产区,最终保留的文献中,有关亚洲水稻收获阶段损

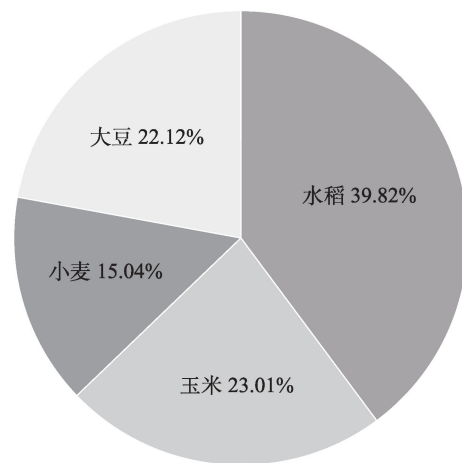


图4 检索到的4类粮食作物在文献库中的次数占比

Figure 4 Proportion of the times that the four types of grains were studied based on the publications in the database

失的文献数量也是最多的;对于美洲而言,美国和巴西分别是世界重要的玉米和大豆生产国,因此有关玉米和大豆产后收获损失的研究也相对丰富。

3.3 文献研究的时间分布

从发表年份来看,自20世纪60年代以来,世界各国(地区)对收获阶段减损的关注虽然不多,但从未停止(图5)。值得注意的是,美国等发达国家对于收获减损的注意力集中在2011年之前的年份,也就是FAO明确界定食物损失与食物浪费的概念并引入减损理念之前^[1]。在这之后,发达国家将关注点聚焦到产后后端环节(如物流运输、储存等)的食

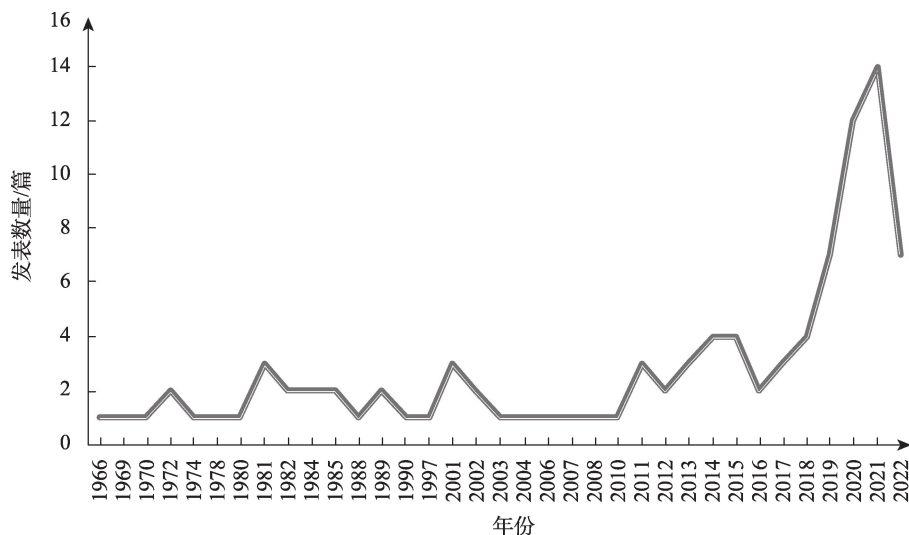


图5 文献库中文章的发表年份统计

Figure 5 Annual number of publications in the literature database

2023年9月

物损失问题。在FAO明确提出减少食物损失以保证全球粮食安全和可持续发展的目标后^[4],全球关注粮食收获损失的文献数量较之前出现明显增长,仅2020和2021两年能检索到的相关文献就分别达到12和14篇。

3.4 收获损失率分析

在最终保留的98篇文献中,共有77篇文献详细报告了粮食作物的损失率数据。文献中报告的粮食作物总体产后平均收获损失率的均值为6.65%。其中,小麦的平均收获损失率均值为12.18%,高于其他3类粮食作物的平均收获损失率均值。小麦平均收获损失率的中位数值为8.33%,也是粮食作物中最高的(图6),这说明全球小麦整体的产后收获损失情况相对较高。剩余3类粮食作物中,大豆的最小收获损失率和最大收获损失率的中位数值最高,玉米的平均损失率中位数值最高(图6)。玉米的3项损失率(最大、最小和平均)均值接近4类粮食作物损失率的均值,因为玉米是全球最广泛种植的作物之一,也是全球产量最高的粮食作物^[1],不论从种质资源、种植水平还是收获技术来看,不同地区之间的共性较多。本文检索到的涉及玉米收获阶段损失的研究涵盖了美洲、亚洲、非洲、欧洲的发达国家(地区)和发展中国家(地区),其损失率数据应该能代表全球粮食损失的基本情况。

图7呈现了不同发展状态国家(地区)的最小、最大和平均收获损失率的均值分布情况。其中,发达国家(地区)平均收获损失率的中位数略高于发展中国家(地区)。保留文献收集的发达国家(地

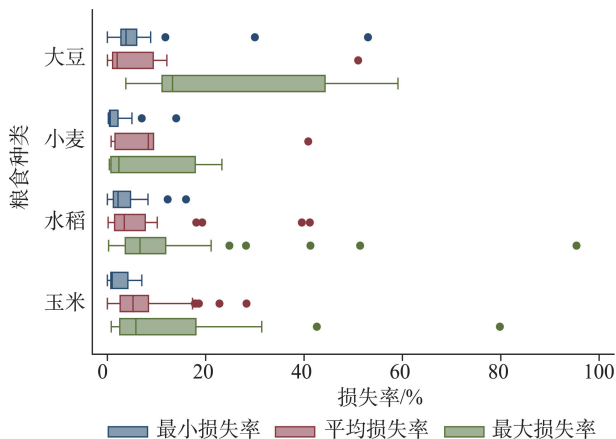


图6 4种粮食作物的收获损失率统计

Figure 6 Statistics of harvest loss rate of the four types of grains

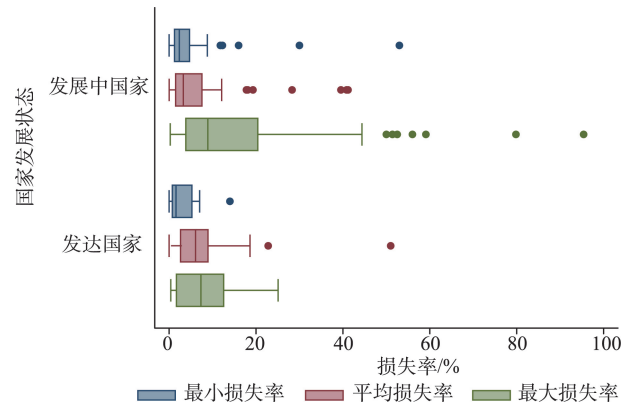


图7 不同发展状态国家的粮食收获损失率统计

Figure 7 Statistics of grain harvest loss rate in countries with different development status

区)收获损失率数据中,学者仅对机收开展了损失统计和分析工作,而且关注发达国家(地区)收获损失率文献的发表年份总体相对较早。从图8可以看出,非洲的最小、平均和最大收获损失率的均值在各大洲中都是最高的,与此同时,关注非洲粮食收获损失率的文献仍然偏少,表明非洲区域粮食损失问题较为突出。

根据各国2001—2020年的平均粮食贸易竞争力指数与其对应的平均损失率拟合情况(图9),可以看出,不同国家(地区)的粮食平均收获损失率同粮食贸易竞争力的相关性较小($p>0.05$)。例如,中国2001—2020年期间的平均粮食贸易竞争力指数为-0.36,低于美国、澳大利亚、印度、泰国,粮食的平均收获损失率也低于以上4国。肯尼亚、哥伦比亚等国虽然粮食贸易竞争力低,但粮食平均损失率较高,减损空间较大。

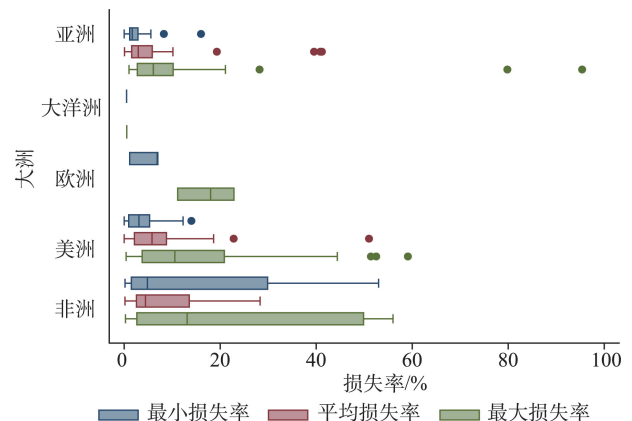


图8 不同大洲的粮食收获损失率统计

Figure 8 Statistics of grain harvest loss rate in different continents

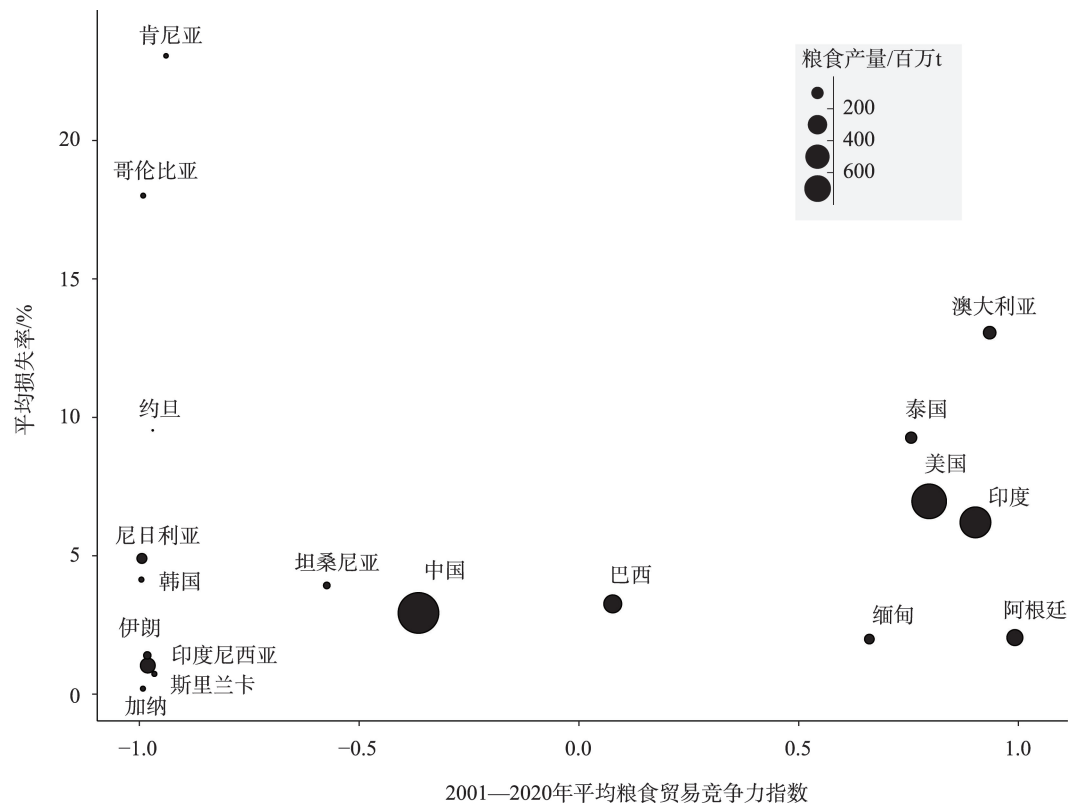


图9 2001—2020年贸易竞争力与平均收获损失率的线性拟合图

Figure 9 Linear fitting line between trade competitiveness and average harvest loss rates, 2001-2020

3.5 收获损失影响因素

为了深究损失率数据背后的成因,并提出有针对性的减损方法与措施,本文将粮食收获阶段损失分为两个主要部分:第一类是由于种植和管理等因素造成的收获前损失。主要是穗损失,包括由于自然灾害或真菌感染等造成作物过早倒伏,以及主要由杂草、害虫、气候因素等引起的病害损失。第二类是由人工、机械、气候等因素共同造成的收获时损失。主要分穗损失和籽粒损失,多由收获操作不当导致作物的穗或茎秆倒伏、穗掉落或未成功脱粒等引起(表1)。据此,本文对文献中讨论的收获

损失因素进行了进一步归纳梳理,将其中涉及到的因素概括为三方面,包括环境因素(自然环境和社会经济环境),劳动力因素和技术条件因素。

4 讨论

4.1 自然环境与粮食收获损失

极端天气、自然灾害、高温等自然环境因素经常导致作物在收获阶段出现损失。这是因为这些环境因素与作物含水量高度相关,从而可以直接或间接导致粮食损失。例如,粮食在湿度偏高时收获容易萌发成芽,在湿度偏低时又容易发生破碎损失^[12,13]。研究表明不同年份粮食收获损失的差异与

表1 收获损失的分类

Table 1 Classification of harvest losses

阶段	分类	细类	成因
收获前损失	穗损失	倒伏损失	自然灾害或真菌感染等造成作物过早倒伏
		病害损失	主要由杂草、害虫、气候因素等引起
收获时损失	穗损失	倒伏损失	收获操作时触碰到了作物致使使其的穗或茎秆倒伏
		收集时的损失	主要由摘穗时的穗落造成,特别是在籽粒含水率较低时
	籽粒损失	破碎损失	籽粒在被切割过程中打开时掉落在地上造成的损失
		脱粒/分离损失	籽粒未成功脱粒或随糠或秸秆一起离开未被收获造成的损失

2023年9月

收获时的天气状况有关^[14];恶劣天气的出现对小麦的收获阶段产量具有显著的负面影响^[15];收获季高温多雨曾致使撒哈拉以南非洲地区种植的水稻、危地马拉和洪都拉斯种植的玉米有相当一部分数量在收获过程中因脱穗、霉变而白白损失掉^[1,5]。由极端天气引发的自然灾害(洪水、干旱)也会大幅削减粮食的收获产量^[16,17]。美国俄亥俄州的一项研究发现,几乎90%的粮食收获损失与迟收有关^[14];Gleim等^[18]根据对美国玉米联合收割机进行的对照实验发现,当收割机在满足收获要求的良好天气条件下运行时,田间可见的总收获损失仅占估计产量的1%,而天气条件恶劣时,收获损失显著增加。在巴西的一些大豆玉米轮种的地区还存在早收现象,即为了在大豆收获后迅速种植玉米,农民们往往安排提前收割大豆,导致大豆偏湿,甚至有些豆荚还没有完全成熟,从而导致损失的增加^[19]。另一方面,作物收获时含水量偏低也会导致一定的损失,例如,玉米收获时如果含水量偏低,籽粒的破碎损失会显著增加^[21]。Paulsen等^[20]对收割机的对照实验表明,当大豆的收获水分下降到13%以下时,破碎损失也会显著增加。水稻收获损失与含水量则表现相反,Ndindeng等^[5]利用试验田中不同籽粒含水量对水稻的收获损失数据进行回归,结果表明当撒哈拉以南地区的稻谷含水率从15%增加到30%时,人工收获和机器收获的田间收获损失都会降低。

自然环境因素导致的损失虽较难通过人力来扭转,但可以通过开发新的技术,人为改善有限环境中作物的生长条件、加强病虫害和自然灾害等风险发生的预测能力,从而将收获损失降到最低。比如,晚收粮食并任由粮食在田间自然晾干,会增加粮食在田间发生霉变等损失的可能性^[5],但通过普及干燥技术和设备,可以在较短的时间内烘干粮食,并降低粮食霉变和虫害风险。为了避免小麦在收获时遭遇极端天气而产生萌动或发芽,科学家也在试图通过调节 α 淀粉酶活性,从而研发可以延迟发芽的小麦新品种^[22]。中短期的气象预报的准确度一直在提升,对于研判不同地区作物的收获时期,有积极的辅助决策作用。

4.2 社会经济环境与粮食收获损失

社会经济环境关乎农业产后收获中的资本投入,是最为复杂的影响因素之一,这一点在发展中

国家(地区)表现的更为突出。一个典型的例子是非洲地区,这里的社会治安稳定性不高、经济常年因金融缺乏活力与稳定而导致投资不足、与农业配套的基础设施建设水平较低等^[23,24],这些因素使得社会经济资源很难从硬件或技术方面实现粮食收获减损。部分国家和地区,如尼日利亚政府,曾在21世纪的前10年积极推行机械化,却因复杂的政治因素而不了了之^[25]。

发展中国家(地区)在农业现代化过程中,不可避免会面临劳动力转移问题,造成从事粮食收获的劳动力减少。作为人工收获的升级换代,机械化收获极大地改善了粮食产后系统的劳动生产率,具有积极的社会经济影响。例如,在繁忙的收获期,机器可以代替人工进行劳动,使得农村劳动力可以腾出时间从事其他生产活动,也有助于缓解一些地区由于劳动力缺乏造成高雇佣成本以及粮食收获不及时而引起的损失问题^[26];机器的操作和维护还为广大的农村青年提供了新的就业机会^[15]。

在农业现代化的进程中,劳动力的年龄、务农年限、受教育程度等社会经济环境特征也会对粮食的收获损失造成一定影响。Castelein等^[25]认为年龄较大或种植年限较高的农民经验更多,有利于粮食收获损失的减少;农民的受教育程度越高,其对新技术的接受度可能更高,从而可以更有效地降低收获阶段损失。但也有研究指出,生产者的教育和经验虽然与粮食减损有关,但在不同的样本中该因素的影响并不全部显著,需根据具体情况进行分析^[1]。由机收造成的损失中,劳动力技术培训不足是主要因素之一^[24,27,28]。因此,对农民进行收获相关的教育和培训有助于减少粮食收获损失^[29]。收割机操作人员的失误和不正当的工作态度曾使印度尼西亚部分地区水稻形成严重的脱粒损失^[28]。在一些发展中国家(地区),例如孟加拉国,由于人工收获效率低下,收获季往往需增加劳动力人数,造成劳动力短缺和雇佣成本过高等问题,也会进一步对收获的粮食质量造成不利影响^[9]。在农业技术匮乏的一些发展中国家(地区),由于人力资源的限制,种植面积过大基本上都会造成粮食收获的延迟^[26,30]。因此,技术操作与劳动力条件往往是相辅相成的,与整个社会的劳动力水平密切相关。

社会化服务的介入为农村劳动力的转移提供

了很好的解决方案。社会化服务通常由农民与拥有机械化设备和技术人员的企业或社会组织签订协议,委托其按约定对自家农作物进行机械收割,并按期给予其一定报酬。然而,已有研究表明这种社会化服务也会造成一定程度的粮食收获损失^[15]。这是因为,通常情况下,当操作员驾驶收割机以较慢的速度运行并在收割过程中对速度进行适当调整时,损失率会维持在较低水平。但在收获季节,社会化服务组织经常面临非常高的服务需求,出于降低工作量或者尽早完工的想法,收割机操作员往往倾向于迅速收割完大豆,从而导致大豆的收获损失较农民自行收割时更高^[15]。这种在最佳收获季为多个农民超负荷服务的情况总会促使收割机操作员不按规定参数进行操作,特别是超速驾驶从而导致损失增加。因此,在与社会化服务组织签订合同时,可将损失率或者驾驶速度作为考核或者惩罚指标,从而在一定程度上避免由委托导致的损失率增加。对中国而言,由政府出资,加大对农户机械化发展的扶持力度,并通过政策鼓励更多的社会化专业服务组织介入农业收获链条,从而形成完善的区域化市场格局,是较为可行的思路。

4.3 粮食收获损失的技术因素

产后收获阶段的机械化水平已成为发达国家(地区)与发展中国家(地区)农业发展水平的重要差别。已有研究表明收割机正在快速应用和普及于巴西的农业生产活动中^[20],然而,收割机技术的普及虽然显著提升了劳动产生效率,但并没有对减少大豆收获损失起到促进作用,反而增加了收获损失比例。这是因为机械收获通常较为粗糙,容易造成作物损伤和遗漏,导致比农民手工收获更高的收获损失^[31],但也有少部分研究认为机械化会减少收获损失^[2]。

现有文献关于影响粮食收获的技术因素的讨论主要围绕收获方法和机械化中联合收割机参数的设置开展,内容相对丰富。这部分损失的影响因素较为复杂,首先是收割机的速度与切割高度。一项马来西亚的稻田实验表明,收割机的田间速度通常设置在3.87~6.11 km/h之间,当使用最大时速收割时,损失率最大达到了2.5%,而当采用最慢田间速度的时候,收割机收获仅造成0.67%的粮食损失^[32]。降低速度可以使联合收割机与高度较低的作

物进行充分接触,从而减少收获损失^[15]。作物的切割高度也不宜过高,Rebilas等^[33]发现当大豆的切割高度从5 cm增加到10 cm时,损失会增加2~3倍。此外,联合收割机各部分参数的设置,例如其头部滚轮速度调整和零件之间的距离设置^[34-36]等因素对于减少收获损失都很关键。只有设置正确的机器参数和合理规范的机器操作才可能最大限度减少收割机的操作损失,但目前关于收割机各部分速度、位置等参数对收获损失的影响证据不一。研究普遍认为,当无法掌握最佳参数时,收割机说明书中建议的参数就是最好的参考^[37]。因此,为实现最大程度的收益,有必要匹配足够数量有经验的农业技术人员,同时对收割机及运行参数进行合理的设置,并根据农田环境和作物生长状态进行必要的调整。

20世纪70年代起,谷物机械收获技术开始广泛应用于欧洲和北美发达国家^[27,38,39]。发达国家由此对如何减少粮食收获损失进行了大量研究,并认为最重要的一项措施就是为作物品种的持续改良和收获机械性能的不断提供技术支持。因此,虽然发达国家关注收获损失的文献数量在2010年之后减少了,而且将更多的关注焦点转移到食物浪费问题,但事实上,在减损方面的努力从未停止,但更多以专利或者设备更新的方式展开。自2000年以来,Web of Science中搜索到由发达国家注册的关于粮食收割机相关专利的数量增长可以说明这一点。从现有专利情况来看,发达国家粮食收割机相关专利一直显著高于发展中国家(地区)。仅美国针对调节地面速度等收割机参数、优化收割机的视觉感知及控制系统、收割机自身收获损失率测算等的专利数量就多达400多个,并呈递增趋势。但与欧洲和北美相比,相当数量的发展中国家(地区)的机械收获技术的发展还处于相对早期的阶段,发展中国家(地区)对联合收割机收获性能研究的缺乏也限制了该技术的应用和推广。目前,中国主粮作物已基本实现全程机械化,其中,小麦、水稻、玉米机收率分别超过97%、94%、80%^[40]。因此,中国学界应重视对于粮食机械收获的技术、材料、操作办法等的深入研究,根据国内经济条件和产业发展,持续修订、更新技术标准,尤其需要细化收割机各部分的操作精度和损失上限,为机械收获技术的减损提供专业支撑。

为了从整体上保证收获阶段的损失最小化,还需要将涉及到的农机设备及相关技术进行合理的规范、运用和普及。然而,技术的规范、运用和普及通常需要一定成本,在广大的发展中国家(地区)也就意味着更高的投入。对于已有研究关注的大多数发展中国家(地区)而言,在耕作模式中占主导的并非机械化大农场,而是自给自足的小农经济^[41,42]。大多数农民既没有机械操作知识,也无法获得所需的收获设备和技术。在没有政府财政支持的情况下,从设备的购买与维护,到操作人员的培训和技术更新等,单纯靠农民的自发性是很难实现的。从长远来看,设备和技术的引入、应用成本的增加能够被效率提升带来的收入增加所抵消,使得机械化的收益将远大于其成本^[25],但短期内的资金投入也是需要考虑的重要因素。

4.4 粮食收获损失的关联因素

与收获相邻的阶段(种植、干燥、储存)对产后减损也有一定关联。根据前文对于收获损失来源的梳理,可知一部分的收获损失是由于收获前的一些因素造成的,比如,由于不当的种植管理,杂草入侵、病害以及虫害等因素常常导致作物生长良莠不齐,从而加大了收获时的异质性,导致作物收获损失更高^[43-46]。

干燥与储存阶段设备的缺乏也会增加收获后损失。在无法储存多余农产品或者储存条件不足的情况下,即便收获阶段的损失减少了,在后续存储的过程中这部分粮食也会逐渐损失掉。但是,由于减损成本的存在以及零售端低迷的粮食市场价格,这些损失有可能大大消减农民的收获减损意向,导致一些农民缺乏减损的积极性,也不会主动在粮食收获时进行减损^[9]。因此,我国政府还应进一步加强农业转型过程中产后阶段的农业基础设施建设,为农民营造良好的产后粮食收获、干燥和储存条件。

5 中国的产后减损及对策

从国际上看,各国治理粮食收获损失经验大体划分为两种模式:一是政府严格立法,规范粮食收获行为;二是社会组织动员多方力量,加强粮食收获的减损意识和技术支撑。技术不仅可以提高自然因素的防范能力,也可以提高收获效率,同时也

可提供更适宜的储藏条件,从而尽可能多的减少食物损失^[47]。因此,技术将逐步成为未来节粮减损的最重要手段,这也是中国推动“藏粮于技”战略的重要原因^[48,49]。根据武拉平等^[47]的研究,2015年中国三大主粮(水稻、小麦、玉米)在收获阶段的综合损失率为3.94%,水稻、小麦和玉米的收获损失率分别为2.95%、3.00%和2.00%。这些粮食损失率数值均低于文献得到的全球粮食作物总体产后平均收获损失率(6.65%)和水稻、小麦、玉米各自的平均收获损失率(6.72%、12.18%、6.65%),且中国三大主粮的综合收获损失率介于发达国家(地区)与发展中国家(地区)粮食平均收获损失率的最小值之间,这说明近些年中国粮食收获阶段的减损水平在逐步向发达国家(地区)的领先水平靠近。事实上,中国的很多减损做法和案例已经得到了许多国家(地区)和国际机构的关注和参考^[47]。

需要认识到,由于收获阶段的损失并不可能实质性减少到零,因此,抵消所有损失的唯一途径是通过额外生产来弥补。当生产的增长率逐步高于损失的增长率,补偿就是足够的,但这就需要通过资源配置或技术创新来实现。然而,发展要素往往是有限且短缺的,将更多的资源投入到哪一边需要衡量减损和增产的机会成本。未来的相关研究可以从技术对收获损失的影响方面着手,深入探讨二者之间的关系。当然,宣传教育、树立爱粮节粮意识等也是节粮减损的重要措施之一。

近年来,中国各级政府充分依靠技术创新,大力推动技术节粮行动,推广智能绿色高效收获机械,大功率、高效率的机械不断普及,收获损失率不断得到控制,但还存在减损机制尚不完善,控制食物损失的技术标准模糊不清等问题。对此,结合前文的相关分析,本文提出3点面向中国粮食收获减损的建议:

(1)政府应从资金层面加大对农业机械化发展的扶持力度,并动员相关人员和社会组织对收割机操作人员进行操作规范、机器维护等方面的专业培训。

(2)科研人员应重视对于粮食机械收获的技术、操作方法等的深入研究,根据国内经济条件和产业发展需要持续更新、修订新的技术标准,为机械收获技术的减损提供专业支撑。

(3)政府应进一步加强控制农业转型过程中产后阶段的农业基础设施建设,营造良好的产后粮食收获环境。

6 结论

本文采用PRISMA指南,对全球粮食产后收获损失的文献进行了系统回顾,通过构建全球大豆、水稻、玉米、小麦4类粮食产后收获损失文献数据库和损失率及损失因素数据集,综述分析了全球4类粮食作物收获损失率及地区差异,总结了不同国家(地区)4类主要粮食作物的损失率及可能的影响因素。主要结论如下:

(1)全球收获损失研究主要聚焦于发展中国家(地区);关注的主要粮食种类是水稻,其次是玉米和大豆;研究最多的地域是亚洲。在FAO明确提出减少食物损失以保证全球粮食安全和可持续发展的目标实现后,全球粮食收获损失的研究热度空前高涨。

(2)粮食作物总体产后平均收获损失率的均值为6.65%,小麦的平均收获损失率均值、中位数值在所有粮食作物中最高,全球小麦整体的产后收获损失相对较高。发达国家(地区)粮食平均收获损失率的均值略高于发展中国家(地区),不同国家(地区)的粮食平均收获损失率同粮食贸易竞争力没有明显的相关关系。

(3)影响收获损失因素可概括为环境因素(自然环境和社会经济环境)、劳动力因素和技术条件因素。其中,极端天气等自然环境因素与作物含水量、收获时间等高度相关,往往导致粮食在收获阶段的直接或间接损失。劳动力的年龄、务农年限、受教育程度等社会经济环境特征都会对粮食的收获损失造成影响。发展中国家(地区)的农业机械化进程提高了粮食收获效率,一定程度上缓解了发展中的劳动力转移问题,但社会化服务发展产生的委托等问题对收获损失的影响不容忽视。缺乏对联合收割机装备和性能的研究,也限制了发展中国家(地区)机械化技术的应用和推广。

最后,本文结合上述结论及国际治理粮食收获损失经验和模式,提出了面向国内粮食收获减损的对策建议,为中国粮食收获阶段减损干预措施的提出提供了参考。

参考文献(References):

- [1] Delgado L, Schuster M, Torero M. Quantity and quality food losses across the value Chain: A comparative analysis[J]. Food Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.foodpol.2020.101958.
- [2] Gummert M, Nguyen Van H, Cabardo C, et al. Assessment of post-harvest losses and carbon footprint in intensive lowland rice production in Myanmar[J]. Scientific Reports, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-76639-5.
- [3] 罗屹, 黄东, 黄汉权, 等. 中国粮食产后损失及其隐性成本解密[J]. 农业经济, 2022, (11): 17-19. [Luo Y, Huang D, Huang H Q, et al. Declassification of post-production loss and hidden cost of grain in China[J]. Agricultural Economy, 2022, (11): 17-19.]
- [4] FAO. The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on Food Loss and Waste Reduction[M]. Rome: United Nations, 2019.
- [5] Ndindeng S A, Candia A, Mapiemfu L D, et al. Valuation of rice postharvest losses in Sub-Saharan Africa and its mitigation strategies[J]. Rice Science, 2021, DOI: 10.1016/j.rsci.2021.04.001.
- [6] Rusdin, Witjaksono J, Indrasti R, et al. Study of Harvesting Losses for Sustainable Agricultural Production in Southeast Sulawesi (a Case Study in Konawe District)[C]. Kendari: Proceedings of the 2nd International Conference on Improving Tropical Animal Production for Food Security, 2020.
- [7] 郭如良, 刘子玉, 陈江华. 农户兼业化、土地细碎化与农机社会化服务: 以江西省为例[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(1): 135-143. [Guo R L, Liu Z Y, Chen J H. Part-time farming, land fragmentation, and socialized agricultural machinery services: A case study of Jiangxi Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(1): 135-143.]
- [8] Hodges R J, Buzby J C, Bennett B. Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: Opportunities to improve resource use[J]. The Journal of Agricultural Science, 2010, 149(1): 37-45.
- [9] Bala B K, Haque M A, Hossain M A, et al. Post Harvest Loss and Technical Efficiency of Rice, Wheat and Maize Production System: Assessment and Measures for Strengthening Food Security [R]. Dhaka: Bangladesh Agricultural University, 2010.
- [10] Kitchenham B. Procedures for Performing Systematic Reviews[R]. Keele: U. K Keele University, 2004.
- [11] Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, et al. Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011.
- [12] Tefera T. Post-harvest losses in African maize in the face of increasing food shortage[J]. Food Security, 2012, 4: 267-277.
- [13] Pinheiro Neto R, Troli W. Mechanical soybean harvest loss (Glycine Max (L.) Merrill) in Maringa, state of Parana[J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2003, 25(2): 393-398.
- [14] Wang K R, Xie R Z, Ming B, et al. Review of combine harvester losses for maize and influencing factors[J]. International Journal of

2023年9月

- Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 1–10.
- [15] Arends-Kuenning M, Garcias M, Kamei A, et al. Factors associated with harvest and postharvest loss among soybean farmers in Western Paraná State, Brazil[J]. Food Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.foodpol.2022.102363.
- [16] Debaeke P, Bertrand M. Evaluation of drought impacts on crop yields in France[J]. Cahiers Agricultures, 2008, 17(5): 437–443.
- [17] Ganji Z, Shokoohi A, Samani J M V. Developing an agricultural flood loss estimation function (case study: Rice)[J]. Natural Hazards, 2012, 64: 405–419.
- [18] Gliem J A, Holmes R G G, Wood R K. Corn and Soybean Harvesting Losses[R]. U.S.: American Society of Agricultural Engineers, 1990.
- [19] Goldsmith P D, Martins A G, De Moura A D. The economics of post-harvest loss: A case study of the new large soybean-maize producers in tropical Brazil[J]. Food Security, 2015, 7: 875–888.
- [20] Paulsen M R, Pinto F D A D C, Jr D S D G, et al. Measurement of combine losses for corn and soybeans in Brazil[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(6): 841–855.
- [21] 王克如, 李璐璐, 鲁镇胜, 等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 1–7. [Wang K R, Li L L, Lu Z S, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai Region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 1–7.]
- [22] Tai L, Jin H, Xu X J, et al. Pre-harvest sprouting in cereals: Genetic and biochemical mechanisms[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(8): 2857–2876.
- [23] Danbaba N, Idakwo P Y, Kassum A L, et al. Rice postharvest technology in Nigeria: An overview of current status, constraints and potentials for sustainable development[J]. Open Access Library Journal, 2019, DOI: 10.4236/oalib.1105509.
- [24] Kaminski J, Christiaensen L. Post-harvest loss in sub-Saharan Africa—what do farmers say?[J]. Global Food Security, 2014, 3(3–4): 149–158.
- [25] Castelein R B, Broeze J, Kok M G, et al. Mechanization in rice farming reduces greenhouse gas emissions, food losses, and constitutes a positive business case for smallholder farmers: Results from a controlled experiment in Nigeria[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, DOI: 10.1016/j.clet.2022.100487.
- [26] Hasan M K, Saha M R, Alam C K, et al. Combine harvester: Impact on paddy production in Bangladesh[J]. Journal of the Bangladesh Agricultural University, 2019, 17(4): 583–591.
- [27] Hoof H J. Machine and Machine Operator Characteristics Associated with Corn Harvest Kernel Damage[D]. Iowa: Iowa State University, 1972.
- [28] Rohani M Y, Shariffah Norin S A, Samsudin A. Post-harvest losses of paddy in the Krian/Sungei Manik areas[J]. MARDI Research Bulletin, 1985, 13(2): 148–154.
- [29] Basavaraja H, Mahajanashetti S B, Udagatti N C. Economic analysis of post-harvest losses in food grains in India: A case study of Karnataka[J]. Agricultural Economics Research Review, 2007, 20(1): 117–126.
- [30] Begum N S, Akhtaruzzaman K M, Mohan S S, et al. Adoption of improved wheat management practices: An empirical investigation on conservation and traditional technology in Bangladesh[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2021, DOI: 10.1016/j.jafr.2021.100143.
- [31] Luo Y, Huang D, Qu X, et al. An inverse relationship between farm Size and rice harvest loss: Evidence from China[J]. Land, 2022, DOI: 10.3390/land11101760.
- [32] Mokhtor S A, El Pebrian D E, Johari N A A B. Actual field speed of rice combine harvester and its influence on grain loss in Malaysian paddy field[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(6): 422–425.
- [33] Rebilas K, Klimek-Kopyra A, Baciór M, et al. A model for the yield losses estimation in an early soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar depending on the cutting height at harvest[J]. Field Crops Research, 2020, DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107846.
- [34] Ferreira E, Freitas B J A. Yield and grain quality of flood rice infested with adults of rice stink bug[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2006, 41(7): 1083–1091.
- [35] Vaz Mondo V H, Cicero S M, Dourado Neto D, et al. Effect of seed vigor on intraspecific competition and grain yield in maize[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(1): 222–228.
- [36] Bonilla C, Terra J, Gutiérrez L, et al. Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay[J]. Agrociencia Uruguay, 2015, 19(1): 112–121.
- [37] Humburg D. Combine Adjustments and Soybean Harvest Losses [R]. Brookings: South Dakota State University, 2019.
- [38] Klinner W E, Biggar G W. Some effects of harvest date and design features of the cutting table on the front losses of combine-harvesters[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1972, 17(1): 71–78.
- [39] Bolland M D A. Grain losses due to delayed harvesting of barley and wheat[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1984, 24(126): 391–395.
- [40] 崔建玲. 机收减损要在两个关键要害发力[N/OL]. (2023-01-18) [2023-03-22]. https://szb.farmer.com.cn/2023/20230118/20230118_001/20230118_001_8.htm. [Cui J L. Reducing the Loss of Mechanical Harvest Requires Efforts at Two Key Points[N/OL]. (2023-01-18) [2023-03-22]. https://szb.farmer.com.cn/2023/20230118/20230118_001/20230118_001_8.htm.]
- [41] Chegere M J. Post-harvest losses reduction by small-scale maize farmers: The role of handling practices[J]. Food Policy, 2018, 77: 103–115.
- [42] Qu X, Kojima D, Wu L P, et al. The losses in the rice harvest process: A review[J]. Sustainability, 2021, DOI: 10.3390/su13179627.
- [43] Daramola O S. Timing of weed management and yield penalty due

- to delayed weed management in soybean[J]. *Planta Daninha*, 2020, DOI: 10.1590/S0100-83582020380100072.
- [44] Elumalai K, Pramod K, Kedar V. Assessment of pre and post harvest losses of rice and red gram in Karnataka[J]. *Agricultural Situation in India*, 2015, 72(9): 101-105.
- [45] Mueller D S, Wise K A, Sisson A J, et al. Corn yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2016 to 2019[J]. *Plant Health Progress*, 2020, 21: 238-247.
- [46] Burnside O C. Influence of weeds on soybean harvesting losses with a combine[J]. *Weed Science*, 1973, 21(6): 520-523.
- [47] 武拉平. 我国粮食损失浪费现状与节粮减损潜力研究[J]. *农业经济问题*, 2022, (11): 34-41. [Wu L P, Grain loss and waste in China: Current situation, reduction potential and counter-measures[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, (11): 34-41.]
- [48] 武拉平. 节粮减损的国际视野[J]. *中国粮食经济*, 2023, (1): 60-63. [Wu L P. The international perspective of food conservation loss[J]. *Chinese Grain Economy*, 2023, (1): 60-63.]
- [49] 罗屹, 苗海民, 黄东, 等. 农户仓类设施采纳及其对玉米储存数量和损失的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(9): 1777-1787. [Luo Y, Miao H M, Huang D, et al. Household decisions on adoption of advanced storage facilities and impacts on maize storage volume and losses in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(9): 1777-1787.]

A research review of global grain harvest losses

MU Ruotong^{1,2}, WU Liang¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Due to differences in economic and technological development levels, post-harvest losses (PHL) in different stages of the grain value chain varies greatly across the world. Identifying the extent of PHL and the influencing factors globally can provide crucial information for food loss reduction in China. **[Methods]** This study focused on grain harvest losses and selected 98 relevant publications according to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) guidelines. We constructed a database of international publications on grain PHL, including academic papers and research reports on four types of grain crops (rice, corn, wheat, and soybean). **[Results]** The results show that the attention to PHL of grains is increasing globally in the past decades, but focused mainly on the developing countries and regions in Asia, Africa, and South America. On average, the post-harvest grain losses at the global level are 6.651%, but heterogeneity of grain harvest losses existed in different countries due to factors such as climate, harvest methods, technical conditions, and labor quality. Although the introduction of mechanized harvesting has improved the production efficiency, the impacts of non-standard operation and the use of third-party contractor services on harvest losses cannot be ignored. The lack of research on combine harvester performance also limited the application of mechanization technologies. Besides, equipment and facility shortages in the stages of drying and storage also led to increased PHL. **[Conclusion]** Therefore, we suggest paying more attention to the research of mechanical harvest technologies and operation methods, as well as renewing and revising technical standards continuously and improve the infrastructure environment for harvesting according to domestic economic conditions and industrial development. This study also provided detailed information and policy recommendations for PHL reduction in China.

Key words: post-harvest losses (PHL); harvest losses; influencing factors; meta analyses; PRISMA guidelines