

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53079

综述

基于产量差的作物大面积单产提升策略与展望

王宇诚^{1,**} 张露^{2,**} 刘阿康³ 黄见良¹ 彭少兵¹ 袁坤^{1,*}

¹ 作物遗传改良全国重点实验室 / 湖北洪山实验室 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 / 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北武汉 430070; ² 华中农业大学经济管理学院, 湖北武汉 430070; ³ 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125

摘要: 在“新一轮千亿斤粮食产能提升行动”背景下, 大面积单产提升被确立为保障国家粮食安全的核心战略路径。近年来, 尽管我国粮食总产量持续稳定增长, 但在水土资源紧张和生态环境压力不断加剧的条件下, 依赖扩大耕地面积实现增产的空间已十分有限。围绕“主要粮食作物是否仍具备增产潜力、增产空间有多大以及如何实现”等关键科学问题, 产量潜力与产量差研究为定量评估增产空间、识别限制因素及设计增产技术路径提供了重要理论与方法支撑。本文系统梳理了产量潜力评估和产量差解析的研究进展, 揭示了不同作物和区域的潜在增产空间及关键制约环节, 并据此提出了面向大面积单产提升的差异化技术路径: 对于产量差较大的地区, 应以优化栽培管理和资源配置为重点, 加快缩小可利用产量差; 对于产量差较小的地区, 则需通过育种创新、关键技术突破与种植制度优化, 推动产量潜力上限提升。与此同时, 分析了当前增产技术推广应用中面临的主要瓶颈, 指出科研成果与农户实际生产之间衔接不足, 导致技术大面积落地转化困难。未来, 有必要在产量潜力评估、产量差诊断、技术集成与推广机制等环节形成协同闭环, 通过技术创新与政策和制度支持的协同推进, 在有限耕地和资源环境约束条件下实现粮食生产能力的持续提升, 为国家粮食安全和农业可持续发展提供科学支撑。

关键词: 大面积单产提升; 产量潜力; 产量差; 技术路径; 粮食安全

Strategies and prospects for large-scale crop yield improvement based on yield gap

Wang Yu-Cheng^{1,**}, Zhang Lu^{2,**}, Liu A-Kang³, Huang Jian-Liang¹, Peng Shao-Bing¹, and Yuan Shen^{1,*}

¹ National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement / Hubei Hongshan Laboratory / MARA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China; ² College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China; ³ National Agricultural Technology Extension and Service Center, Beijing 100125, China

Abstract: In the context of the “New Round of the 100-Billion-Jin Grain Production Capacity Enhancement Initiative”, large-scale yield improvement has been identified as a core strategic pathway for ensuring national food security in China. Although national grain production has remained high and stable in recent years, further yield increases through cropland expansion are increasingly constrained by limited water and soil resources and growing environmental pressures. Addressing the key scientific questions of “whether major food crops still have room for yield improvement, how large this potential is, and how it can be realized”, research on yield potential and yield gaps provide an essential theoretical and methodological foundation to quantify production potential, identify limiting factors, and design yield-enhancement strategies. This paper systematically reviews recent

本研究由国家自然科学基金项目(T2261129473, 72473049), 国家重点研发计划项目(2023YFD1900600), 武汉市自然科学基金探索计划(2024040801020290)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (T2261129473, 72473049), the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1900600), the Natural Science Foundation of Wuhan (2024040801020290), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-01).

* 通信作者(Corresponding author): 袁坤, E-mail: syuan@mail.hzau.edu.cn

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 王宇诚, E-mail: wangyc@webmail.hzau.edu.cn; 张露, E-mail: luzhang@mail.hzau.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-10-15; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-01-26.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260124.0920.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

advances in yield potential assessment and yield gap analysis, revealing the magnitude of untapped yield potential and the dominant constraints across different crops and regions. Based on these insights, differentiated technical pathways for large-scale yield improvement are proposed. In regions with large yield gaps, priority should be given to optimizing crop management practices and resource allocation to accelerate yield gap closure. In contrast, in areas where yield gaps are relatively small, further yield gains rely on breeding innovation, key technological breakthroughs, and cropping system optimization to raise yield ceilings. In addition, this paper analyzes major bottlenecks in the dissemination and application of yield-enhancing technologies, highlighting the persistent disconnect between scientific outputs and on-farm practices that hampers large-scale adoption. Looking ahead, establishing a coordinated and closed-loop framework encompassing yield potential assessment, yield gap diagnosis, technology integration, and on-farm implementation will be critical for translating scientific advances into sustained productivity gains. Through the synergistic advancement of technological innovations and supportive policy and system arrangements, China can continue to enhance its grain production capacity under constraints of limited arable land and environmental resources, thereby strengthening food security and agricultural sustainability.

Keywords: large-scale yield improvement; yield potential; yield gap; technology pathways; food security

在全球人口持续增长、资源环境约束趋紧以及气候变化风险不断加剧的背景下,保障粮食安全已成为我国农业发展的首要战略任务。近年来,我国粮食生产取得了显著成就,粮食总产量连续多年稳定在 1.3 万亿斤以上,为国家经济社会稳定发展提供了有力支撑^[1]。然而,随着耕地面积和水资源压力日益趋紧,依赖扩大耕地规模实现增产已不再现实。2024 年,国务院出台《新一轮千亿斤粮食产能提升行动方案(2024—2030 年)》,明确强调通过良田、良种、良法、良机系统集成来实现主要粮食作物的稳产高产,并特别强调“把粮食增产的重心放在大面积提高单产上”这一核心任务^[2]。与局部试验田追求“高产纪录”不同,大面积单产提升强调在广阔农田范围内实现普遍、稳定和可持续的产量提高,这不仅关系到能否在有限耕地条件下满足庞大人口的粮食需求,也决定了农业能否在资源环境约束下走上绿色高效的发展道路^[3]。

在这一战略背景下,亟须回答一个根本性问题:我国主要粮食作物是否仍具备进一步增产的潜力?若存在潜力,空间有多大?又应通过哪些技术或政策途径将潜力转化为现实产量?已有研究表明,产量潜力与产量差构成了科学评估粮食增产空间的核心理论框架,其中,产量潜力反映在非资源受限条件下品种和生态环境所能达到的上限产量,而产量差则表征当前生产水平与潜力水平之间的差距^[4-6]。正因为“大面积单产提升”的本质是在普遍生产条件下缩小产量差、提升实际产量水平,因此,“产量潜力-产量差”框架直接为目标区域的增产空间评估、限制因素识别以及技术路径设计提供了科学依据,是实现大面积单产提升的理论基础与方法核心。

基于上述背景,本文以“大面积单产提升”为战略主线,系统梳理了产量潜力与产量差的理论基础

与方法进展,评估我国主要粮食作物在大面积单产提升过程中面临的资源环境、技术与制度挑战,评估增产空间,并提出相应的技术路径与政策对策。本文的创新点在于:从国家战略需求出发,将产量潜力-产量差分析与大面积单产提升目标紧密结合,构建适用于我国不同作物、区域和生产条件的增产空间评估框架,并提出具有可操作性的技术组合和政策体系,为“新一轮千亿斤粮食产能提升行动”提供科学支撑。

1 大面积单产提升的内涵与必要性

“大面积单产提升”是指在广阔农田尺度上,通过集成和优化良种、良法、良机、良田等多环节要素,实现主要粮食作物在广阔农田上的普遍、稳定和可持续增产^[3]。其核心不在于少数试验田的极限高产,而在于可复制、可推广的增产路径在大面积生产中的全面落地^[7]。这一概念的提出,是在耕地紧缺、资源压力加剧和粮食安全战略升级背景下的重要发展方向。

当前我国耕地面积有限且部分区域呈下降趋势,而人口规模增长和膳食结构升级共同推动粮食需求长期处于高位水平,依靠扩大播种面积实现增产的传统路径已难为继。在此背景下,提高单产成为保障粮食安全的必然选择。然而,实现这一目标不应局限于少数示范区的高产表现,而必须在大面积生产条件下实现广泛、稳定的增产,才能有效支撑国家层面的粮食供给能力^[8-9]。同时,伴随土地质量下降、水资源紧缺及劳动力减少等制约增强,农业生产进一步通过提升投入强度实现增产的空间正在不断收窄^[10]。通过提高作物光能利用效率、优化水肥管理、改善土壤条件和提升品种适应性等方式,以更高的资源利用效率支撑产量增长,已成为农业增

产由要素投入驱动向效率提升驱动转变的重要方向^[11]。此外,长期以来部分地区依赖过量施肥、灌溉和化学防控等方式追求产量,导致面源污染加重、生态系统退化以及生产体系脆弱性增强^[12-13]。大面积单产提升强调在广泛实现增产的基础上改进投入结构,提高资源利用效率,不以极限产量为目标,实现增产与绿色、环保、低碳目标的统一,因而更契合农业绿色发展和国家“双碳”目标的总体要求^[14]。通过在大面积尺度上提高单产,可以在保持资源环境压力可控的前提下提升粮食供给能力,从而促进农业生产在经济效益、资源效率和生态效益之间实现更加均衡的发展。

2 理论基础: 产量潜力与产量差

产量潜力(yield potential)与产量差(yield gap)是理解和推动大面积单产提升的核心概念。前者界定了作物在最优条件下可达到的产量理论上限,后者揭示了在现实生产中尚未被利用的增产空间^[4-5,15]。二者的系统研究为定量评估粮食增产可能性、识别制约因素以及制定区域差异化技术路径提供了科学依据。

产量潜力是指在没有生物与非生物胁迫的条件下,作物在最优管理下能够达到的最高产量^[16]。其大小取决于作物遗传特性、气候资源配置(光、温、水)、土壤供肥能力及耕作制度^[4-5,16]。例如,在光温资源丰富的地区,水稻和玉米的潜力产量显著高于冷凉或干旱生态区^[17]。作为理论上限,产量潜力既反映了遗传改良的边界,也体现了区域自然资源条件的差异。产量差是实际产量与产量潜力之间的差距,是衡量增产空间的重要指标^[4-5]。其形成受多重因素制约:栽培管理不到位(品种选择不当、播栽期不合理、密度和施肥不科学等)、水资源短缺与土壤养分供给不足、病虫害防控不力,以及农户资金投入能力与技术采纳水平等社会经济因素^[15,18-19]。换言之,产量差不仅是生物学和生态学问题,还带有明显的管理学和经济学属性。

研究表明,在大面积生产中,完全缩小产量差通常需要大量的农业投入,但这种投入的经济效益较低,且随着产量差的减小,进一步缩小的难度也会增加^[20]。实际产量若能稳定在产量潜力的80%左右,通常被认为是最经济且可持续的水平,这一水平被称为可达到产量(图1)。这一概念充分考虑了实际的农业管理、技术应用和资源投入,超过这一水

平往往意味着需要过高的投入,而低于这一水平则表明存在显著的增产空间^[5,21]。与理想的产量潜力相比,可达到产量更贴近实际生产条件,具有更强的可操作性和实践指导意义。例如,埃及水稻和美国玉米在实际产量接近产量潜力的80%后,便长期维持在该水平附近,说明这一阈值具有普遍意义^[22]。将产量潜力与产量差结合研究,能够从“边界”和“空间”2个维度刻画作物增产的可能性。一方面,产量潜力的大小决定了不同作物和区域理论上的增产上限。另一方面,产量差的大小和分布揭示了哪些区域、哪些生产环节存在可改进的余地。这种“双重视角”不仅能够回答“作物是否还能增产、增产空间有多大”的科学问题,也为制定因地制宜的技术路径和差异化政策提供了定量依据。

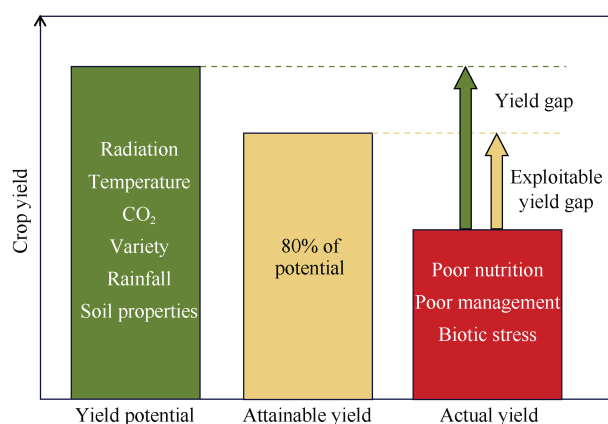


图1 产量潜力、可达到产量以及产量差的定义

Fig. 1 Definitions on yield potential, attainable yield, and yield gap

产量潜力指在没有生物与非生物胁迫条件下,作物在最优管理下能够达到的最高产量,它受到自然条件如气候、土壤质量和CO₂浓度等的影响。可达到产量是指在大面积生产条件下,通过优化管理和技术应用,农民能够实现的最高产量,通常为产量潜力的80%。产量差是指产量潜力与实际产量之间的差异,反映了作物在理想条件下和实际生产中的产量差距。它揭示了作物未能充分发挥潜力的程度,通常由于资源或技术限制造成。可缩小产量差则是指可达到产量与实际产量之间的差距,反映了在大面积生产条件下,通过改进管理措施和技术应用能够缩小的产量差^[20]。

Yield potential refers to the maximum yield a crop can achieve under optimal management conditions, free from both biotic and abiotic stresses, and is influenced by natural factors such as climate, soil quality, CO₂ concentration, and others. Attainable yield represents the yield that farmers can attain under large-scale production conditions through optimized management and technological applications, typically about 80% of the yield potential. The yield gap is the difference between yield potential and actual yield, reflecting the disparity between crop yields under ideal conditions and those achieved in actual production. It indicates the extent to which the crop has not fully realized its potential, usually due to limitations in resources or technology. The exploitable yield gap refers to the difference between attainable yield and actual yield, indicating the portion of the yield gap that can be closed under large-scale production conditions through improved management practices and technological innovations^[20].

3 产量潜力评估的研究进展

产量潜力评估是识别主要作物增产空间的重要前提。过去数十年,该领域的方法经历了从单点观测到区域模拟,再到多源数据融合的不断演进,评估精度和应用范围显著提升(表 1)。早期研究主要依赖于田间高产试验和典型高产纪录,即在优良生态条件下结合优化农艺措施获得的产量,用以推

断作物的潜在产量水平^[16,23]。这类方法直观且可操作性强,但结果易受环境波动影响,难以反映大面积区域的稳定水平。随后,一些学者开始利用大规模农户调查作为补充,选择产量排名前 5%~10%的农户代表先进群体水平,从而间接反映现实生产条件下的潜力^[4,24]。这种方法贴近生产实际,但受限于调查成本高、样本代表性不足,难以在更大尺度上推广。

表 1 产量潜力评估方法之间的比较
Table 1 The comparison among methods on yield potential estimation

方法 Method	特点 Characteristic	优点 Advantage	局限性 Limitation
田间高产试验 Field high-yield trials	科研人员在试验田中优化管理 Researchers optimize crop management in experimental plots	精度高、结果直观 High accuracy, direct results	覆盖面窄,代表性不足 Limited coverage, poor representativeness
高产纪录 High-yield records	示范田或高水平农户田实测 Yield measured in demonstration fields or top-performing farmers' fields	可操作性强、激励作用大 Highly practical, strong incentive effect	受自然条件和投入影响大,缺乏普遍性 Strongly affected by natural conditions and inputs, limited generalizability
高产农户产量 Top farmer yields	调查产量排名前 5%~10%的农户 Based on surveys of the top 5%~10% highest-yielding farmers	贴近实际、反映先进管理水平 Reflects real-world practices and advanced management	调查成本高,受样本代表性限制 High survey cost, limited by sample representativeness
作物模型模拟 Crop model simulation	输入气象、土壤、品种等参数 Uses parameters such as climate, soil, and variety	可跨区域、跨年份模拟,适用性广 Applicable across regions and years, wide adaptability	依赖数据质量,结果不确定性大 Depending on data quality, results carry high uncertainty
遥感与机器学习 Remote sensing & machine learning	多源遥感+统计/机器学习 Integrates multi-source remote sensing with statistical or machine learning methods	空间覆盖广、估算快速 Broad spatial coverage, rapid estimation	受遥感分辨率与校准限制,算法复杂 Limited by resolution and calibration of remote sensing data, algorithmic complexity

作物生长模型的发展显著推动了产量潜力研究。自 20 世纪 80 年代起,过程驱动型作物生长模型(如 DSSAT、APSIM、ORYZA 等)逐渐成为主流工具。这些模型能够在输入作物、气象、土壤和管理参数的基础上,模拟作物在最优条件下的生长过程和产量潜力^[25-27]。目前,基于作物模型的模拟已广泛应用于我国水稻、玉米和小麦等主要粮食作物的产量潜力评估,并形成了较为完整的区域性成果^[17,28-31]。全国范围内,玉米平均(2003—2022 年)产量潜力为 12.5 t hm⁻²,在灌溉和雨养条件下分别为 14.6 t hm⁻²和 10.9 t hm⁻²^[32]。水稻平均(2003—2022 年)产量潜力为 10.6 t hm⁻²,其中,单季稻和双季稻单季产量潜力分别为 11.4 t hm⁻²和 9.0 t hm⁻²^[33]。小麦平均(2008—2017 年)产量潜力为 10.3 t hm⁻²,在灌溉和雨养条件下分别为 12.5 t hm⁻²和 6.6 t hm⁻²^[32]。大豆平

均(2010—2019 年)产量潜力为 4.1 t hm⁻²,在灌溉和雨养条件下分别为 4.7 t hm⁻²和 4.0 t hm⁻²^[34]。然而,这类研究多集中在省域或国家尺度,难以揭示田块间的差异,尤其在雨养区,降水的时空分布、土壤持水量和灌溉条件常成为决定潜力能否实现的关键约束^[4]。

新兴技术的引入使产量潜力评估迈向精细化。高分辨率遥感数据结合地理信息系统和作物模型,使得跨区域比较和田块级潜力评估成为可能。机器学习与人工智能方法则通过整合气象、土壤、遥感和农户管理等多源数据,提升了评估的精度与适用性^[35-36]。这些方法在动态监测和实时预测方面具有明显优势,逐渐成为传统模型的重要补充。近年来,国内外已涌现出基于遥感和大数据的潜力产量空间分布图谱,为跨区域差异诊断和政策制定提供了直观依据。

尽管进展显著,但产量潜力评估仍面临若干突出挑战。首先,模型参数化和遥感解译需要高质量的长期观测数据,但目前多点连续监测体系仍不完善,制约了方法的验证与改进^[19]。其次,大多数研究仍停留在静态评估阶段,对气候变化背景下产量潜力的动态变化考虑不足^[37]。最后,在田块尺度的评估应用中,如何将结果与农户管理行为结合,形成可操作的技术建议,仍是未来突破的关键。总体而言,产量潜力评估已从经验性探索逐渐发展为依托模型和多源数据的定量化研究,并正向更高分辨率、更强动态性的方向迈进。这些进展为后续的产量差解析和区域化技术路径制定提供了方法学基础。

4 产量差研究进展与解析

在系统揭示作物在理想条件下能够达到的产量上限之后,一个更加现实且紧迫的问题是在实际生产中,这些潜力究竟转化了多少,又有哪些尚待挖掘?换言之,只有在明确产量潜力的基础上,进一步识别潜力与现实之间的差距,才能回答“增产空间有多大”的核心问题。作为衡量作物增产潜能的核心指标,产量差的研究经历了由定性判断到定量化评估、由局部到全球尺度的演进^[16-17,38]。20世纪90年代以来,国际科研机构率先构建了系统化的产量差评估框架,使这一概念逐渐成为农业科学与粮食安全战略的重要工具。研究方法的演变最初,产量差的计算主要依赖于统计产量与试验产量的对比,回答的核心问题是“是否存在差距”。随着作物模型的成熟和遥感监测的普及,研究逐渐转向区域乃至全球尺度的定量化评估,不仅能够计算差距的大小,还能揭示其时空分布格局及主导因子^[17,35]。例如,基于作物模型与遗传参数、气象、土壤和管理数据的模拟,可以获得产量潜力,再与实测值或统计产量对比,从而计算产量差。这一方法已成为国际主流,并在多个典型作物和地区得到应用^[17,28-30]。

在国际范围内,最具代表性的是全球产量差图谱项目(Global Yield Gap Atlas, GYGA)。该项目建立了统一的评估方法,综合利用高质量气象、土壤与管理数据,结合作物模型模拟产量潜力,再与统计或实测产量对比^[32]。结果显示,玉米、小麦和水稻等三大主粮作物在全球普遍存在20%~60%的产量差,尤其是在撒哈拉以南非洲、南亚和拉美等中低收入国家,实际产量往往不足产量潜力的一半。以水稻为例,全球平均实际产量仅相当于产量潜力的

约57%,且不同地区差异显著^[17]。如埃及、美国加州和中国东北等灌溉稻区的实际产量已接近产量潜力的75%,而非洲和东南亚多数稻作系统的实际产量不足产量潜力的一半。在同一大洲或相近生态区内,不同国家甚至同一国家内部的差距也十分突出。例如,越南湄公河流域的灌溉稻与缅甸中部灌溉稻的实际产量分别接近产量潜力的75%和20%,凸显了管理与资源条件在决定产量差上的关键作用。

国内研究起步稍晚,但近年来发展迅速。基于作物模型和遥感数据的模拟表明,我国水稻、玉米和小麦的平均产量水平已处于世界前列,但区域差异依然突出^[28-30]。玉米方面,灌溉与雨养玉米的实际产量分别为产量潜力的58%和65%^[32,39](图2)。西北地区灌溉玉米实际产量仅为产量潜力的50%,产量差最大;东北和华北平原地区实际产量可达产量潜力的60%。在雨养区,西北地区产量差最小(实际产量占产量潜力85%),而西南地区最大(53%)。以水稻为例,全国平均产量仅为产量潜力的68%^[33]。其中,单季稻和双季稻的实际产量分别占产量潜力的68%和67%,在同一个种植制度中,不同省份差异可达25个百分点以上。我国小麦在灌溉和雨养条件下的实际产量占产量潜力的比例差异较大,分别为49%和72%^[32]。其中,灌溉小麦区主要集中于长江中下游平原和黄淮海平原,其实际产量仅达到该地区潜力的38%~61%,仍有较大的产量提升空间。大豆同样存在较大的增产潜力,全国平均实际产量仅为产量潜力的47%^[34]。其中,华南地区因产量潜力低而实际产量已达71%,增产空间有限;东北和华北地区产量潜力高但实际产量仅为潜力的一半左右,提升空间更大。这些结果表明,中国虽然整体粮食生产水平较高,但仍存在结构性和区域性的增产潜力。

现有产量差研究在分析框架和尺度上不断深化,但在动态和综合解析方面仍存在明显不足与挑战。首先,多数研究集中在产量差的静态评估,缺乏对气候变化和管理措施变动等动态因素的系统考量。其次,虽然遥感和大数据的应用提升了评估精度,但对田块尺度的异质性捕捉仍有限,尤其在小农户占主导的地区,农户管理差异对产量差的影响尚未被充分量化。此外,产量差解析更多停留在自然和技术因素层面,对社会经济因素的系统性纳入仍不够深入^[37]。总体而言,产量差研究已完成从“有无差距”的定性讨论到“差距多大、为何存在”的定量化解析的转变。国际上通过GYGA等项目绘制了全球图

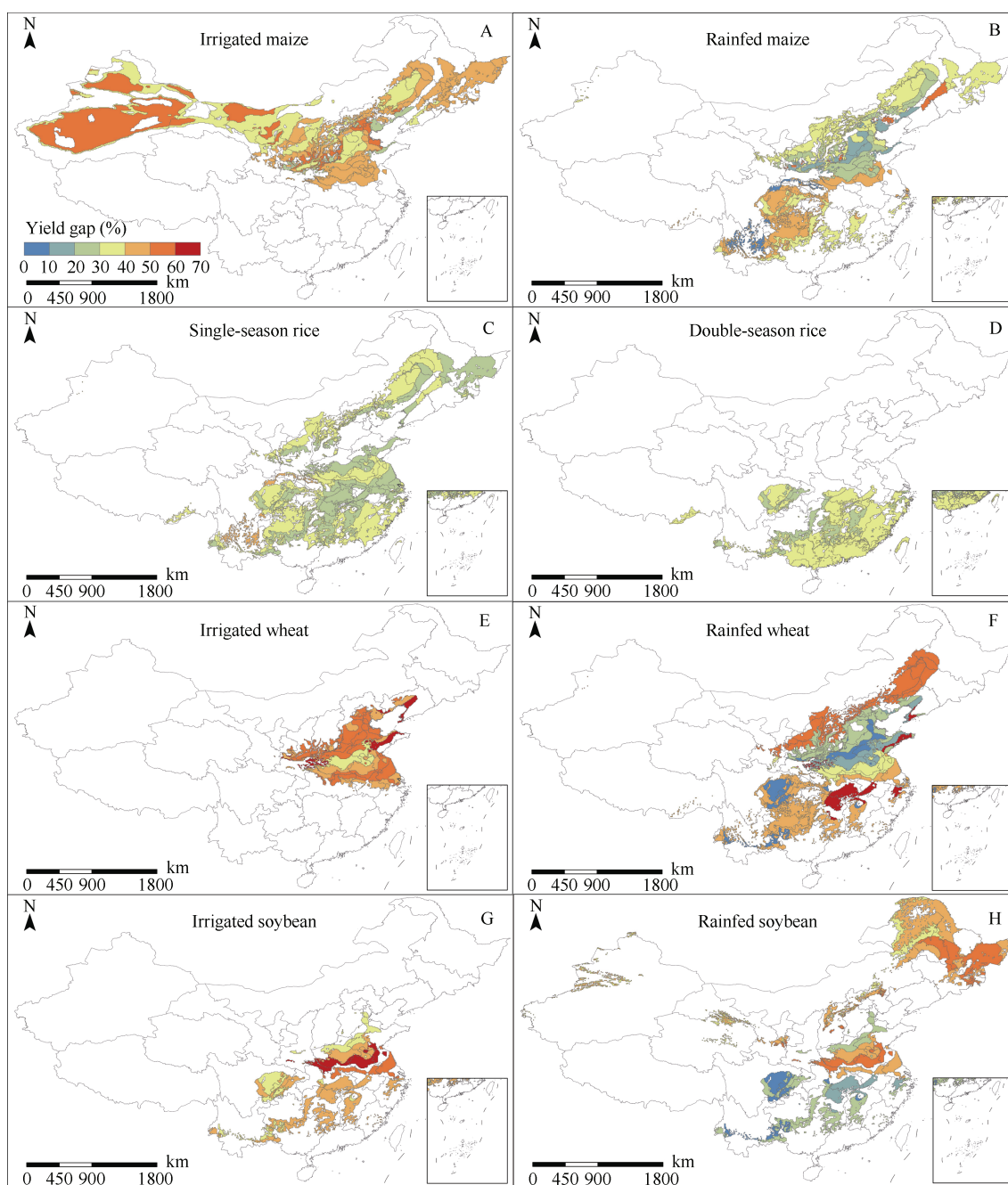


图 2 我国玉米、水稻、小麦和大豆的产量差(表示为占产量潜力的百分数)

Fig. 2 Yield gaps (expressed as percentage of yield potential) of maize, rice, wheat, and soybean in China

图 A–H 分别为我国灌溉玉米和雨养玉米^[32], 单季稻和双季稻^[33], 灌溉小麦和雨养小麦^[32], 灌溉大豆和雨养大豆^[34]系统在农业气候区水平的产量差。该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作。底图边界无修改。

Figures A–H show the yield gaps of the irrigated and rainfed maize^[32], single- and double-season rice^[33], irrigated and rainfed wheat^[32], irrigated and rainfed soybean^[34] systems at the agricultural climate zone level, respectively. This map is based on the standard map downloaded from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources of China with the approval number GS (2024) 0650. The boundary of the base map is not modified.

谱, 国内在主要作物和重点区域也取得了系列成果。但未来仍需推动高分辨率、多学科交叉和动态化的产量差解析, 才能为制定精准的技术路径和区域化政策提供更有力的支撑。

5 面向大面积单产提升的技术路径

在系统认识产量潜力与产量差的空间格局和主导成因之后, 如何将 these 研究成果转化为促进大面

积单产提升的可操作方案,成为亟须解决的核心问题。产量差的成因具有明显的多维性。自然条件是背景,包括气候波动、土壤肥力差异和水资源约束^[40-41];管理水平是直接决定因素,播栽期、密度、施肥策略和病虫害防控等对产量差具有显著影响^[42-43];社会经济因素则通过资金投入、技术采纳和政策支持间接作用于产量水平^[44-45]。不同区域和作物的增产潜力存在差异,这意味着缩小产量差和发挥产量潜力必须因地制宜、分类施策。研究表明,在全球19个产量差大(单产不足潜力60%)的水稻种植区域中,若将平均产量提升至可达到产量,全球年稻米产量

可增加1.46亿吨^[17]。这一发现显示,通过缩小产量差可以显著缓解未来粮食供需矛盾。对于中国而言,若在耕地面积基本稳定的前提下,依靠品种改良和栽培技术创新保持与过去30年相近的单产增长速率,到2030年基本可实现水稻供给自足^[28]。同时,以往研究表明,通过改进玉米和大豆的管理措施缩小产量差,有望实现玉米全面自给,并将大豆自给率提升至45%^[30]。因此,基于产量差的区域分布,将农田划分为“优先增产区(产量差大)”和“潜力饱和区(产量差小)”,并根据每个区域的主要制约因素制定不同的技术路径(图3)。

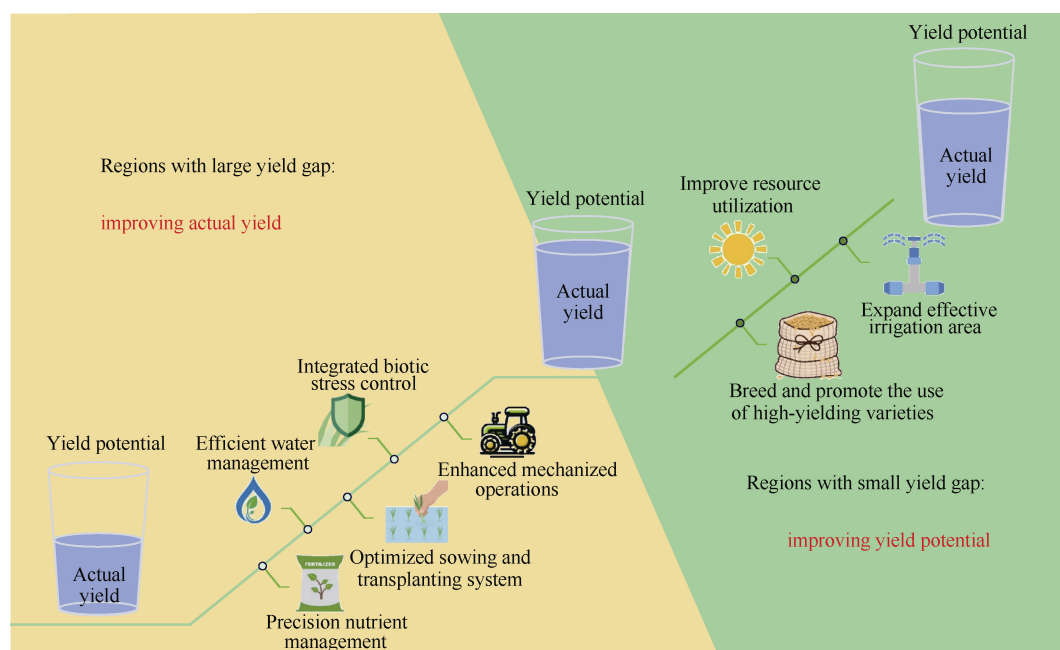


图3 不同产量差情境下作物增产策略

Fig. 3 Crop yield increase strategies in different yield gap scenarios

本图展示了两类区域的划分及相应的技术优先措施。左侧部分表示产量差较大的区域,主要目标是通过一系列措施缩小产量差并提升实际产量。关键技术包括:精准施肥,高效水分管理,优化播种与移栽,综合病虫害管理和机械化作业。这些技术措施通过优化现有生产管理,旨在缩小产量差提高当前生产条件下的产量水平。右侧部分表示产量差较小的区域,主要目标是提高产量潜力,突破产量上限。优先采取的技术措施包括:育种创新与品种更新,温光资源的高效利用以及灌溉面积的扩展。此类技术通过改善作物的生长环境,增强作物产量潜力^[46-48]。

This figure illustrates the division of two types of regions and their corresponding prioritized technical measures. The left section represents areas with a large yield gap, where the primary objective is to reduce the yield gap and enhance actual yield through a series of measures. Key technologies include precision fertilization, efficient water management, optimization of sowing and transplanting, integrated pest and weed management, and mechanization. These measures aim to optimize existing production practices, thereby narrowing the yield gap and improving yield levels under current conditions. The right section represents areas with a smaller yield gap, where the focus is on increasing yield potential and surpassing the yield ceiling. Prioritized measures include breeding innovation and variety updates, efficient utilization of thermal and light resources, and expansion of irrigated areas. These technologies work by improving the crop's growing environment and enhancing its yield potential^[46-48].

在优先增产区,主要目标是通过优化现有栽培管理措施缩小产量差,并提高实际产量。这类区域通常面临资源限制(如养分投入不足、灌溉不足等)或技术限制(如栽培技术不合理导致资源利用效率低)等多重挑战,导致实际产量远低于潜力水平^[42,49-50]。

通过采取精准施肥、高效水分管理、优化播种与移栽、加强病虫害防控等措施,可以在较短时间内显著提高产量。尤其是推广测土配方施肥、控释肥与水肥一体化技术能够显著提升肥料的利用效率;合理安排播栽期与密度,优化作物生育期与光温资源

的匹配;绿色病虫害防控则可减少损失,从而在有限的资源条件下提升产量。为了识别具体田块或区域的制约因素,农户调查是必不可少的工具。通过对大规模农户的系统调查,可以获得关于品种选择、播种期、密度、施肥总量和方式、灌溉策略及病虫害管理等关键信息,进而揭示主要限制环节。例如,在非洲玉米生产中,调查 14,773 个农户后发现,氮肥投入和种子类型是核心因素,适当增加氮肥并推广杂交种可使农户玉米产量提高 58%^[51]。在美国中北部大豆生产中,对 3568 个农户的调查表明,播种期差异是主要制约因素,每提前 1 d 播种平均可增加约 17 kg hm⁻² 的产量^[52]。在乌拉圭的水稻生产系统中,早播与适度增加氮肥投入同样显著提高了产量^[53]。这些研究表明,在管理落后的区域,通过识别并改进关键措施,可以在不显著增加额外成本的情况下大幅缩小产量差。

在潜力饱和区,这些区域的产量差较小、接近潜力上限,因此,提升产量的重点是通过技术突破进一步提升产量潜力。此类区域通常面临技术创新和种植制度优化的制约,而非资源的短缺。遗传改良是核心环节,尤其是通过分子设计育种和基因编辑培育抗逆性强、光合效率高、品质优良的新品种,从源头拓展产量潜力^[28,54-55]。例如,杂交稻的产量潜力普遍比常规稻高 10%~15%,而两系杂交稻又比三系杂交稻高 5%~15%^[46,56-57]。因此,在产量差小的区域持续推进品种改良与更新,是提升产量潜力的重要途径。制度创新同样关键,例如,在光温资源充足的南方稻区推广双季稻或再生稻,在旱作区探索节水型轮作模式,以提高复种指数和系统产出水平^[47]。此外,水利和灌溉基础设施建设也是高产区进一步突破产量潜力的保障条件。相关研究显示,泰国和菲律宾灌溉条件下水稻潜力产量比雨养条件下高 5%~12%;在我国东北大豆生产中,灌溉条件下的产量潜力比雨养条件下高 37%^[17,48]。这些结果表明,在高产区域,进一步提升单产必须依赖新品种、制度优化和基础设施改善的共同作用。

从跨区域来看,单一措施往往难以在复杂多样的农田条件下发挥最大效益,技术集成与模式创新是推动大面积普遍增产的关键。通过良种、机械化栽培、精准水肥管理、病虫害绿色防控等组合模式,已经在部分主产区表现出显著的增产效果^[58]。同时,数字农业与智能化管理的兴起为单产提升开辟了新路径。遥感、物联网和大数据分析可实现对作物生

长状态和环境因子的实时监测,并为农户提供分区分田的精准管理建议,推动生产方式从经验依赖走向数据驱动。智能农机和自动化装备的普及,也正在提高田间作业的精准化和标准化水平,使得大面积生产能够实现更稳定的产量发挥。

由此可见,大面积单产提升并不存在单一的技术解法,而是依赖于区域差异化策略与综合措施的结合。在管理落后地区,优先推广成熟可靠的栽培技术可快速缩小产量差;在接近潜力上限的地区,遗传改良与制度创新是突破瓶颈的关键。在国家尺度上,技术集成与数字化赋能能够促进整体水平的稳步提升。不同区域与不同作物的路径选择虽然各不相同,但共同指向的目标是提升普遍性、稳定性和可持续性,从而在资源有限的条件下实现更高水平的粮食安全保障。

6 技术瓶颈与对策建议

尽管近年来产量潜力评估和产量差解析研究不断深入,并形成了面向不同区域的技术路径,但相关成果在大面积生产中的应用仍面临诸多限制,难以有效支撑大范围产量提升。为实现产量差的实质性缩小,有必要从问题识别、形成机制、技术与政策对策以及未来研究方向等方面进行系统分析。

6.1 存在的主要问题

当前大面积单产提升的技术落地普遍受到以下瓶颈制约。其一,科研成果与农户实际应用之间存在明显的“最后一公里”断层。许多集成技术方案主要在试验站或示范片验证,缺乏在复杂农田环境下的广泛适应性评估,导致技术难以大面积推广^[59]。其二,我国农业生态区差异显著,气候、水资源、土壤肥力与种植制度高度多样化,使得统一化技术在不同区域表现不一,现行推广方式仍存在模式同质化和区域不匹配的问题^[60]。其三,小农户经营主体在技术认知、风险承担能力和前期投入方面普遍受限,即便是成熟技术(如测土配方施肥、控释肥、水肥一体化)也因成本顾虑、收益不确定性或操作复杂而采纳不足^[61-62]。其四,农技推广体系力量薄弱且机制不完善,一些地区技术人员数量不足、经费短缺,推广活动重展示轻转化,缺少适配不同农户条件的差异化技术模式,难以实现规模化推广^[63]。

6.2 形成机制分析

上述问题的形成具有多重机制性原因。一方面,产量差的空间异质性强,不同区域受限因子截然不

同,使得单一措施难以普适有效^[51,64-65]。产量差的形成受光温水气、品种潜力、土壤肥力、管理措施与社会经济条件等多因素耦合作用,仅依靠技术手段难以单点突破^[15,18-19,66]。另一方面,小农户对收益敏感、对风险规避性强,其行为受土地碎片化、劳动力结构与资金约束等因素影响,因此,技术采纳呈现显著的经济驱动性和路径依赖性^[61,67]。此外,现有产量潜力研究在动态性、区域化和农户行为参数量化方面仍有限,对复杂生产场景的解释力和指导力不足,难以形成因地制宜的技术组合与推广路径。这些因素共同导致产量差长期难以有效缩小。

6.3 对策与路径建议

推动大面积单产提升应从技术、组织、制度与数字化支撑多维度协同发力。其一,应构建基于产量差诊断的分区分类技术体系。通过综合利用遥感监测、作物建模与田块尺度调研,将农田划分为优先增产区与潜力饱和区,形成具有区域适应性的技术组合。例如,在优先增产区强化精准施肥、控释肥和水肥一体化快速缩小产量差;在潜力饱和区域侧重品种更新、制度优化与灌溉提升从而突破产量上限。其二,强化数字农业在推广过程中的作用。通过构建县域甚至田块尺度产量差地图、作物长势监测系统与管理建议智能推送平台,可提高技术服务的精度、效率与可及性,实现按地块定方案、按季节调策略。其三,完善农技推广体系并推动技术研发、农技推广和农户应用的深度联动。通过加大基层推广力量配置、鼓励多元社会化服务主体参与推广、推动技术示范由单点高产向多点适应转变,可提升技术采纳的覆盖度与可持续性。其四,与国家“千亿斤粮食产能提升行动”强化战略衔接,围绕重点产区开展集成技术攻关与补短板建设,推动形成以技术增效、装备赋能和制度创新为支撑的多层级推广体系。

6.4 未来研究方向与展望

面向未来,产量差研究亟须在理论深化与方法创新上实现突破。首先,应发展动态化产量差评估框架,将气候变化、管理调整与品种更新等因素纳入时间序列分析,提高对产量差变化趋势与稳定性的预测能力。其次,应强化气候变化适应性研究,探索在高温胁迫、水资源短缺与极端事件增加背景下的增产路径,为不同气候情景下的产量提升提供科学依据。再次,应在产量差分析中系统引入社会经济驱动因子,包括土地规模、劳动力结构、技术成

本、风险偏好与政策激励等,通过计量分析与多主体行为模型实现对技术采纳过程的定量化描述。最后,应构建多源数据融合的诊断体系,将遥感、田间传感器、作物模型与农户调查数据集成,为大面积单产提升提供更高分辨率、更强解释力的科学支撑。

因此,只有从技术机制、社会行为、区域差异和政策体系等多维度协同发力形成政、产、学、研、推、用的闭环机制,并在理论与方法上不断创新,才能在复杂的生产条件下有效缩小产量差,推动我国主要粮食作物大面积单产实现持续、稳定提升。

7 结语

大面积提高单产是保障我国粮食安全的核心路径,也是农业在资源环境约束与气候变化挑战下实现绿色转型的必然选择。其重要意义不仅在于增加产量,更在于探索一种可持续的生产模式,通过合理利用有限的耕地、水土资源和投入,实现粮食安全、资源高效利用与生态环境保护的有机统一。本文基于产量潜力和产量差的理论框架,分析了我国主要粮食作物在大幅度单产提升过程中的技术路径与政策对策。尽管产量潜力与产量差研究已为增产空间评估提供了理论支持,但实际问题在于如何将科学认知转化为普遍的生产力,并在大范围生产中实现稳定增产。未来,大面积单产提升将依赖于技术突破、遗传改良和栽培技术的持续进步,同时通过政策引导和数字化技术的支撑,推动各区域的差异化技术路径和应用模式。在这一过程中,我国农业完全有条件通过持续创新和系统集成,实现粮食生产能力的稳步提升,为全球粮食安全与农业可持续发展贡献新的经验与方案。

References

- [1] 国家统计局. 2024年全国粮食产量迈上新台阶: 国家统计局农村司副司长魏锋华解读粮食生产情况. (2024-12-13) [2025-08-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202412/t20241213_1957743.html. National Bureau of Statistics of China. National grain production in 2024 reaches new high level: Wei Fenghua, Deputy Director of the Department of Rural Surveys of the National Bureau of Statistics interprets the situation of grain production. (2024-12-13) [2025-08-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202412/t20241213_1957743.html.
- [2] 国务院. 实施新一轮千亿斤粮食产能提升行动: 国家发展改革委负责同志就《行动方案》答记者问. (2024-04-09) [2025-8-30]. https://www.gov.cn/zhengce/202404/content_6944059.htm. State Council of the People's Republic of China. Launching a new round of the 50-million-ton grain production capacity enhancement action-Responsible official of the National Develop-

- ment and Reform Commission answers reporters' questions on the "Action Plan". (2024-04-09) [2025-8-30]. https://www.gov.cn/zhengce/202404/content_6944059.htm.
- [3] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 我国水稻大面积单产提升面临的现实困境与出路. 中国稻米, 2025, 31(4): 1–4.
Xu C C, Ji L, Chen Z D, et al. Current challenges and pathways to enhancing large-scale per-unit yield of rice in China. *China Rice*, 2025, 31(4): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- [4] van Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. *Field Crops Res*, 2013, 143: 4–17.
- [5] Lobell D B, Cassman K G, Field C B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu Rev Environ Resour*, 2009, 34: 179–204.
- [6] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 等. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展. 中国生态农业学报, 2015, 23: 525–534.
Liu B H, Chen X P, Cui Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops. *Chin J Eco-Agric*, 2015, 23: 525–534 (in Chinese with English abstract).
- [7] 国务院. 如何推动粮油作物大面积单产提升(政策问点:推进乡村全面振兴)? (2024-04-05) [2025-08-30]. https://www.gov.cn/zhengce/202404/content_6943559.htm.
State Council of the People's Republic of China. How to promote large-scale yield improvement of grain and oil crops (Policy Focus: advancing comprehensive rural revitalization)? (2024-04-05) [2025-08-30]. https://www.gov.cn/zhengce/202404/content_6943559.htm.
- [8] 仇焕广, 雷馨圆, 冷淦潇, 等. 新时期中国粮食安全的理论辨析. 中国农村经济, 2022(7): 2–17.
Qiu H G, Lei X Y, Leng G X, et al. A comprehensive theoretical analysis of grain security in the new era. *Chin Rural Econ*, 2022(7): 2–17 (in Chinese).
- [9] Zhao H, Chang J F, Havlik P, et al. China's future food demand and its implications for trade and environment. *Nat Sustain*, 2021, 4: 1042–1051.
- [10] Hu Y C, Su M R, Wang Y F, et al. Food production in China requires intensified measures to be consistent with national and provincial environmental boundaries. *Nat Food*, 2020, 1: 572–582.
- [11] 陈阜, 赵明. 作物栽培与耕作学科发展. 农学学报, 2018, 8(1): 50–54.
Chen F, Zhao M. Developments of the crop cultivation and farming system in China. *J Agric*, 2018, 8(1): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李文华, 成升魁, 梅旭荣, 等. 中国农业资源与环境可持续发展战略研究. 中国工程科学, 2016, 18(1): 56–64.
Li W H, Cheng S K, Mei X R, et al. Study on strategies for the sustainable development of China's agricultural resources and environment. *Strateg Study CAE*, 2016, 18(1): 56–64 (in Chinese with English abstract).
- [13] Norse D, Ju X T. Environmental costs of China's food security. *Agric Ecosyst Environ*, 2015, 209: 5–14.
- [14] 王斌, 李玉娥, 蔡岸冬, 等. 碳中和视角下全球农业减排固碳政策措施及对中国的启示. 气候变化研究进展, 2022, 18: 110–118.
Wang B, Li Y E, Cai A D, et al. Global policies in agricultural greenhouse gas reduction and carbon sequestration and their enlightenment to China in the view of carbon neutrality. *Clim Change Res*, 2022, 18: 110–118 (in Chinese).
- [15] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展. 中国农业科学, 2014, 47: 2731–2741.
Yang X G, Liu Z J. Advances in research on crop yield gaps. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 2731–2741 (in Chinese with English abstract).
- [16] Evans L T, Fischer R A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci*, 1999, 39: 1544–1551.
- [17] Yuan S, Linquist B A, Wilson L T, et al. Sustainable intensification for a larger global rice bowl. *Nat Commun*, 2021, 12: 7163.
- [18] Fischer R A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Res*, 2015, 182: 9–18.
- [19] Grassini P, van Bussel L G J, Van Wart J, et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Res*, 2015, 177: 49–63.
- [20] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T, et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu Rev Environ Resour*, 2003, 28: 315–358.
- [21] Cassman K G, Grassini P, van Wart J. Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. In: Hillel D, Rosenzweig C, eds. *Handbook of Climate Change and Agroecosystems*. London: Imperial College Press, 2010. pp 37–51.
- [22] FAOSTAT. Crops and livestock products database. [2025-8-30]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [23] Sayre K D, Rajaram S, Fischer R A. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Sci*, 1997, 37: crops1997.0011183X003700010006x.
- [24] Stuart A M, Pame A R P, Silva J V, et al. Yield gaps in rice-based farming systems: insights from local studies and prospects for future analysis. *Field Crops Res*, 2016, 194: 43–56.
- [25] Grassini P, Thorburn J, Burr C, et al. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res*, 2011, 120: 142–150.
- [26] Li T, Hasegawa T, Yin X Y, et al. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Glob Change Biol*, 2015, 21: 1328–1341.
- [27] 薛昌颖, 杨晓光, 邓伟, 等. 利用 ORYZA2000 模型分析北京地区早稻产量潜力及需水特征. 作物学报, 2007, 33: 625–631.
Xue C Y, Yang X G, Deng W, et al. Yield potential and water requirement of aerobic rice in Beijing analyzed by ORYZA2000 model. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 625–631 (in Chinese with English abstract).
- [28] Deng N Y, Grassini P, Yang H S, et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. *Nat Commun*, 2019, 10: 1725.
- [29] Liu B H, Chen X P, Meng Q F, et al. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China: distinguish irrigated and rainfed conditions. *Agric For Meteorol*, 2017, 239: 108–117.
- [30] Liu Z T, Ying H, Chen M Y, et al. Optimization of China's maize and soy production can ensure feed sufficiency at lower nitrogen and carbon footprints. *Nat Food*, 2021, 2: 426–433.
- [31] 黄少辉, 杨云马, 刘克桐, 等. 河北省小麦产量潜力、产量差与效率差分析. 作物杂志, 2018(2): 118–122.
Huang S H, Yang Y M, Liu K T, et al. Yield potential, yield gap

- and nitrogen use efficiency gap of winter wheat in Hebei province. *Crops*, 2018(2): 118–122 (in Chinese with English abstract).
- [32] GYGA. Global Yield Gap Atlas. [2025-8-30]. <https://www.yieldgap.org>.
- [33] Yuan S, Fang F, Wang Y, et al. Ratoon rice allows millions of smallholders to meet production and environmental goals. *Research Square*. (2025-09-14) [2025-9-30]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7339561/v1>.
- [34] Wang Y C, Ling X X, Ma C M, et al. Can China get out of soy dilemma? A yield gap analysis of soybean in China. *Agron Sustain Dev*, 2023, 43: 47.
- [35] Aramburu-Merlos F, van Loon M P, van Ittersum M K, et al. High-resolution global maps of yield potential with local relevance for targeted crop production improvement. *Nat Food*, 2024, 5: 667–672.
- [36] Zhao Y, Chen X P, Cui Z L, et al. Using satellite remote sensing to understand maize yield gaps in the North China Plain. *Field Crops Res*, 2015, 183: 31–42.
- [37] Yuan S, Saito K, van Oort P A J, et al. Intensifying rice production to reduce imports and land conversion in Africa. *Nat Commun*, 2024, 15: 835.
- [38] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain. *Field Crops Res*, 2013, 143: 98–105.
- [39] Meng Q F, Hou P, Wu L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China. *Field Crops Res*, 2013, 143: 91–97.
- [40] Licker R, Johnston M, Foley J A, et al. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world? *Glob Ecol Biogeogr*, 2010, 19: 769–782.
- [41] 郑娜, 刘秀位, 王锡平. 利用产量差距方法进行华北冬小麦产量受气候影响规律的分析: 以河北省栾城县为例. *中国生态农业学报*, 2014, 22: 234–240.
- Zheng N, Liu X W, Wang X P. Determining the effects of climate on winter wheat yield in Northern China via yield gap analysis: a case study of Luancheng county, Hebei province. *Chin J Eco-Agric*, 2014, 22: 234–240 (in Chinese with English abstract).
- [42] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 2012, 490: 254–257.
- [43] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于DSSAT模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 124–129.
- Liu J G, Chu Q Q, Wang G Y, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model. *Trans CSAE*, 2013, 29(23): 124–129 (in Chinese with English abstract).
- [44] Beza E, Silva J V, Kooistra L, et al. Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *Eur J Agron*, 2017, 82: 206–222.
- [45] 范兰, 吕昌河, 陈朝. 作物产量差及其形成原因综述. *自然资源学报*, 2011, 26: 2155–2166.
- Fan L, Lyu C H, Chen Z. A review on crop yield gaps and the causes. *J Nat Resour*, 2011, 26: 2155–2166 (in Chinese with English abstract).
- [46] Ma G H, Yuan L P. Hybrid rice achievements, development and prospect in China. *J Integr Agric*, 2015, 14: 197–205.
- [47] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44: 845–850.
- Peng S B. Reflection on China’s rice production strategies during the transition period. *Sci Sin Vitae*, 2014, 44: 845–850 (in Chinese with English abstract).
- [48] Zhao J C, Wang Y X, Zhao M Y, et al. Prospects for soybean production increase by closing yield gaps in the Northeast farming region, China. *Field Crops Res*, 2023, 293: 108843.
- [49] Anderson W, Johansen C, Siddique K H M. Addressing the yield gap in rainfed crops: a review. *Agron Sustain Dev*, 2016, 36: 18.
- [50] Saito K, Vandamme E, Johnson J M, et al. Yield-limiting macronutrients for rice in sub-Saharan Africa. *Geoderma*, 2019, 338: 546–554.
- [51] Aramburu-Merlos F, Tenorio F A M, Mashigaidze N, et al. Adopting yield-improving practices to meet maize demand in Sub-Saharan Africa without cropland expansion. *Nat Commun*, 2024, 15: 4492.
- [52] Rattalino Edreira J I, Mourtzinis S, Conley S P, et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agric For Meteorol*, 2017, 247: 170–180.
- [53] Tseng M C, Roel Á, Macedo I, et al. Field-level factors for closing yield gaps in high-yielding rice systems of Uruguay. *Field Crops Res*, 2021, 264: 108097.
- [54] Senapati N, Semenov M A. Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated for wheat in Europe. *Glob Food Secur*, 2020, 24: 100340.
- [55] Cooper M, Tang T, Gho C, et al. Integrating genetic gain and gap analysis to predict improvements in crop productivity. *Crop Sci*, 2020, 60: 582–604.
- [56] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路. *作物学报*, 2016, 42: 313–319.
- Peng S B. Dilemma and way-out of hybrid rice during the transition period in China. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 313–319 (in Chinese with English abstract).
- [57] Huang L Y, Sun F, Yuan S, et al. Different mechanisms underlying the yield advantage of ordinary hybrid and super hybrid rice over inbred rice under low and moderate N input conditions. *Field Crops Res*, 2018, 216: 150–157.
- [58] 边晓萌, 李华锋, 陈彦宾. “十三五”国家重点研发计划“经作”专项杂粮领域资助情况及实施进展概述. *作物杂志*, 2023(4): 1–6.
- Bian X M, Li H F, Chen Y B. Overview of the funding and implementation for miscellaneous grains in “economic crops” special-purpose project of the national key R & D program during the 13th Five-Year Plan. *Crops*, 2023(4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [59] 刘家伸. 玉米种植技术推广应用中存在的问题及策略分析. *安徽农学通报*, 2025, 31(5): 10–12.
- Liu J S. Analysis of problems and strategies in the promotion and application of corn planting techniques. *Anhui Agric Sci Bull*, 2025, 31(5): 10–12 (in Chinese with English abstract).
- [60] 苏姗姗. 农业技术推广中存在的问题与改进对策. *河北农业*, 2025(1): 48–49.
- Su S S. Problems and improvement countermeasures in agricultural technology popularization. *Hebei Agric*, 2025(1): 48–49 (in

- Chinese).
- [61] Zhang X Y, Yang Q, Al Mamun A, et al. Acceptance of new agricultural technology among small rural farmers. *Humanit Soc Sci Commun*, 2024, 11: 1641.
- [62] 阎世平, 龚大永. 我国小农户经营困境与出路. *广西大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 40(6): 19–25.
Yan S P, Gong D Y. The dilemma and way out of small farmers' management in China. *J Guangxi Univ Philos Soc Sci*, 2018, 40(6): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- [63] 李晓辉, 姜春雷, 张杰. 基层农业技术推广工作存在问题及措施. *农业开发与装备*, 2023(7): 130–132.
Li X H, Jiang C L, Zhang J. Problems and measures of agricultural technology extension at grass-roots level. *Agric Dev Equip*, 2023(7): 130–132 (in Chinese).
- [64] Nayak H S, McDonald A J, Kumar V, et al. Context-dependent agricultural intensification pathways to increase rice production in India. *Nat Commun*, 2024, 15: 8403.
- [65] 曹馨元, 杜明利, 王宇诚, 等. 稻油系统周年产量差及形成因素探究: 以湖北省武穴市为例. *作物学报*, 2024, 50: 1287–1299.
Cao X Y, Du M L, Wang Y C, et al. Evaluation of annual yield gap and yield limiting factors in rice-rapeseed cropping system: an example from Wuxue city, Hubei province, China. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 1287–1299 (in Chinese with English abstract).
- [66] 石全红, 刘建刚, 王兆华, 等. 南方稻区水稻产量差的变化及其气候影响因素. *作物学报*, 2012, 38: 896–903.
Shi Q H, Liu J G, Wang Z H, et al. Change of rice yield gaps and influential climatic factors in Southern China. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 896–903 (in Chinese with English abstract).
- [67] Touch V, Tan D K Y, Cook B R, et al. Smallholder farmers' challenges and opportunities: implications for agricultural production, environment and food security. *J Environ Manag*, 2024, 370: 122536.