

## 冬小麦产量差和资源利用效率差及调控途径研究进展

吴芬, 徐萍, 郭海谦, 张正斌

引用本文:

吴芬, 徐萍, 郭海谦, 等. 冬小麦产量差和资源利用效率差及调控途径研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10): 1551–1567.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200180>

(向下翻页, 阅读全文)

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 作物高效用水生理生态调控机制研究

Physio-ecological regulating mechanisms for highly efficient water use of crops

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1465–1475 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180687>

#### 基于AEZ模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析

Spatio-temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 547–558 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170843>

#### 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 995–1004 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160162>

#### 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响

Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1663–1672 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190246>

#### 腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响

Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 365–372 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160700>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200180

吴芬, 徐萍, 郭海谦, 张正斌. 冬小麦产量差和资源利用效率差及调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1551-1567

WU F, XU P, GUO H Q, ZHANG Z B. Advances in research regarding the yield gap and resource use efficiency of winter wheat cultivation and the related regulatory approaches[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1551-1567

# 冬小麦产量差和资源利用效率差及 调控途径研究进展\*

吴芬<sup>1,2</sup>, 徐萍<sup>1</sup>, 郭海谦<sup>3</sup>, 张正斌<sup>1,4\*\*</sup>

- (1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 石家庄市农产品质量检测中心 石家庄 050021; 4. 中国科学院种子创新研究院 北京 100101)

**摘要:** 缩减作物实际产量与潜在产量之间的差距是当前作物科学研究的热点之一, 对保障国家粮食安全有重要意义。研究冬小麦产量差和资源利用效率差形成机制及缩差增效途径, 是大面积持续提高冬小麦现实生产力的迫切需求。本文概述了国内外作物产量差和效率差及调控技术途径的研究进展, 重点综述了冬小麦产量差和资源利用效率差异及调控途径研究进展。指出造成冬小麦产量差和效率差的五大因素为: 品种因素、气候因素、土壤因素、人为管理措施和技术因素以及农户决策因素。最后提出了我国冬小麦产量差和资源利用效率差异及调控技术途径的发展方向: 建立基于云数据分析的区域化冬小麦产量差和资源利用效率差异智慧调控途径; 拓展冬小麦轮作系统下产量差和资源利用效率差异及调控途径的研究; 创建区域模式化简化冬小麦缩差增效技术途径。冬小麦产量差和资源利用效率差异缩减技术创建是我国农业通向精准农业、绿色农业、均衡农业、高产高效农业的必由之路。以上研究进展为我国冬小麦缩差增效提供了理论依据和技术支撑。

**关键词:** 冬小麦; 产量差; 资源利用效率差异; 调控途径

中图分类号: S3-33

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Advances in research regarding the yield gap and resource use efficiency of winter wheat cultivation and the related regulatory approaches\*

WU Fen<sup>1,2</sup>, XU Ping<sup>1</sup>, GUO Haiqian<sup>3</sup>, ZHANG Zhengbin<sup>1,4\*\*</sup>

- (1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shijiazhuang Agricultural Product Quality Testing Center, Shijiazhuang 050021, China; 4. Innovative Academy of Seed Design, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Reducing the gaps between actual yield and potential yield of crops is one of the current topics in crop science re-

\* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300105)、河北省重点研发计划项目(20326403D)和中国科学院种子创新研究院项目(Y905023208)资助

\*\* 通信作者: 张正斌, 主要研究方向为黄淮海现代农业。E-mail: zzb@sjziam.ac.cn

吴芬, 主要研究方向为粮食丰产增效科技创新。E-mail: wufen17@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2020-03-11 接受日期: 2020-05-19

\* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300105), the Key Research and Development Program of Hebei Province (20326403D) and the Project of Innovative Academy of Seed Design of Chinese Academy of Sciences (Y905023208).

\*\* Corresponding author, E-mail: zzb@sjziam.ac.cn

Received Mar. 11, 2020; accepted May 19, 2020

search, and is of great significance in ensuring food security. It is essential to explore the mechanisms underlying the gaps in grain yield and differences in resource utilization efficiency of winter wheat cultivation, to establish the strategies to reduce these gaps, and sustainably meet the requirements of increased total productivity of winter wheat worldwide. In this paper, the overall progress of research regarding the gaps in crop yield, differences in resource use efficiency, and the regulatory technology approaches at home and abroad are summarized first, and then placed in the context of winter wheat cultivation. The five major factors that lead to large gaps in yield and resource use efficiency differences in winter wheat are variety, climate, soil, human management technical factors, and farmers' decision-making. Finally, the following development directions to address these issues in China are proposed: a region-wise control approach based on cloud data analysis should be established; and research on yield gaps, resource use efficiency, and the regulatory approaches under various winter wheat rotation systems should be expanded. Technology approaches involving simplified models for different winter wheat production regions should be developed. Designing technological solutions to bridge the gaps in grain yield and resource use efficiency in winter wheat is inevitable means by which China can lead in the fields of precision agriculture, green agriculture, balanced agriculture, and high-yield and high-efficiency agriculture. The research progress discussed herein provides a theoretical basis and technical support for reducing these differences and enhancing the yield and efficiency of winter wheat in China.

**Keywords:** Winter wheat; Yield gap; Resource use efficiency difference; Regulatory approach

增加粮食作物高产潜力和缩减作物实际产量与潜在产量之间的差距是提高全球粮食总体产量和保障全球粮食安全的两大重要举措<sup>[1]</sup>。自二十世纪六七十年代的绿色革命以来,由于矮秆和半矮秆基因的引入和杂交优势育种、分子遗传育种等技术带来高产品种的开发,粮食产量潜力得到显著提升,加上肥料、灌溉、农药和农机等先进农业技术的广泛应用,全球粮食产量水平提升了 2~3 倍<sup>[2]</sup>。然而,随着耕地面积日益减少、淡水资源日益短缺、肥料和农药等过量施用导致土壤退化、环境恶化日益严重,以及气候变化带来极端气温、冬春季干旱和冻害等威胁频发;目前粮食作物产量增长速率在全球各国减缓甚至停滞的趋势,粮食作物产量增长速度已赶不上口粮、能源、饲料等需求的增加速度;全球粮食生产和安全保障正面临着巨大的挑战<sup>[3]</sup>。已有的粮食作物产量差异和资源利用效率差异(简称产量差和效率差)研究表明,同一粮食作物在不同地区甚至同一地区不同农田中均存在巨大的产量差和效率差,缩减产量差和效率差可以全面提升粮食作物生产能力和对资源的利用效率,并且可在不需要增加耕地面积的前提下增产 50%<sup>[4]</sup>。因此,针对粮食作物产量差和效率差的时空分布及形成原因等方面的研究,已成为一个新的农业绿色可持续发展研究方向;粮食作物产量差和效率差缩减技术途径研究是当前促进粮食作物产量增加的迫切需要。

小麦(*Triticum aestivum*)是全球生产总量位居第二的粮食作物(2017 年为 7.7 亿 t),仅次于玉米(*Zea mays*)<sup>[5]</sup>。中国是全球小麦的最大生产国和消费国,

2017 年小麦在我国种植面积约为 2 451 万  $\text{hm}^2$ ,小麦总产量约占粮食作物总产量的 20%以上,其中冬小麦占 90%以上,小麦进口量约为 442 万  $\text{t}$ <sup>[6]</sup>。由此可见,小麦产量的提升对我国粮食安全起着极其重要的作用。黄淮海平原是我国冬小麦-夏玉米主产区,常年冬小麦播种面积约 1 666.7 万  $\text{hm}^2$ ,占全国小麦播种面积的 2/3,是我国最大的粮仓之一,对我国乃至世界粮食安全都有重要的战略地位<sup>[6]</sup>。

冬小麦产量差和效率差是指冬小麦在各种环境条件下取得的不同产量和效率之间的差值。众所周知,小麦产量不仅受遗传基因的控制,还受环境因素(如光、温、水、肥、土壤条件等)的影响。即使产量最高的品种在不同环境中收获的产量也有差异。由于全球农业生态区不同,各地区小麦实际产量和其对光、热、水、肥等资源的利用效率差异极大<sup>[4]</sup>。发达国家和地区农作物产量差和效率差较小,而发展中国家农作物产量差和效率差较大;东欧国家谷物产量差大于西欧国家谷物产量差<sup>[7]</sup>。我国低产区冬小麦产量和资源利用效率比较低,与高产区的差异巨大。目前,我国农户冬小麦平均产量增加速度小于高产纪录产量增长速度,造成了更大的产量差,因此,冬小麦丰产增效具有极大的空间<sup>[8]</sup>。另外,从时空上进行冬小麦产量差和效率差研究可以为农业政策制定提供重要信息;从调控机理方面进行冬小麦产量差和效率差研究,不仅可以为提高总体产量提供理论基础,而且可以为应对未来不确定气候因素和品种适应性开发等提供技术支持和方案选择。这不仅对于某个地区、某个国家,甚至全球粮食安全都具有深远意义。

本文在前人对作物产量差研究基础上, 重点聚焦近年来冬小麦产量差和效率差及其缩减技术途径的研究进展, 对国内外冬小麦产量差和效率差异形成机制、影响因素、解决途径和未来发展进行研讨, 以期为我国未来持续提高冬小麦总体产量提供理论依据和技术途径。

## 1 作物产量差和资源利用效率差异研究进展

### 1.1 作物产量差研究进展

#### 1.1.1 作物产量差概念

作物产量按大小层次可分为潜在产量和实际产量。潜在产量是指作物的生产潜力, 一般是指在某年份某地区特定光温气候(日照、太阳辐射和温度等)条件下, 在理论最优环境下(没有水分、养分、病虫害等生物胁迫或非生物胁迫因素的限制), 某品种所能获得的最大理论产量<sup>[4]</sup>。潜在产量按定量方法或计算标准不同又可分为多个层次: 光合/光温/气候生产潜力<sup>[9-10]</sup>、模型模拟产量<sup>[11]</sup>、高产纪录产量<sup>[12-13]</sup>、田间试验产量和高产农户产量<sup>[12]</sup>等至少 5 种产量水平。前两种一般通过模型或其他理论公式计算获得, 实际生产中一般以作物高产纪录作为作物可获得产量目标。实际产量是指某农户某生育季从某农田中获得的作物产量, 是在不同环境条件下对潜在产量

不同程度的实现。

作物产量差一般是指上述一种产量上限与一种产量下限之间的差值<sup>[4]</sup>。产量下限一般指农户的实际产量, 在各种环境中的田块中实现。在实际研究中可根据生产条件使农户产量达到其最大的可获得产量, 缩小农户产量与可实现产量之间的差距, 提高作物生产力。以田块实际产量(基础农户产量或农户平均产量  $Y_0$ )为计算基础、以上述 5 种潜在产量为计算上限, 产量差主要分为 5 类<sup>[14]</sup>, 但光温/光合/气候生产潜力较难达到, 或其部分内涵已融入到模型中, 现在产量差层次主要有以下 4 种(图 1): 1) 基于模型模拟产量潜力( $YP_1$ )的产量差  $YG_1$ ( $YG_1=YP_1-Y_0$ ), 即田块实际产量( $Y_0$ )与模型模拟产量之间的差距; 2) 基于高产纪录产量潜力( $YP_2$ )的产量差  $YG_2$ ( $YG_2=YP_2-Y_0$ ), 即田块实际产量与高产纪录产量之间的差距; 3) 基于田间试验产量( $YP_3$ )的产量差  $YG_3$ ( $YG_3=YP_3-Y_0$ ), 即田块实际产量与试验站产量之间的差距; 4) 基于高产农户产量( $YP_4$ )的产量差  $YG_4$ ( $YG_4=YP_4-Y_0$ ), 即田块实际产量与高产农户地块产量之间的差距。也有研究将产量差概念进一步细化, 如研究  $YP_1$  与  $YP_2$  之间的差距等<sup>[13]</sup>, 进一步分析每一种产量差距产生的原因, 从而可以有针对性地研究各种产量差的具体缩减途径。

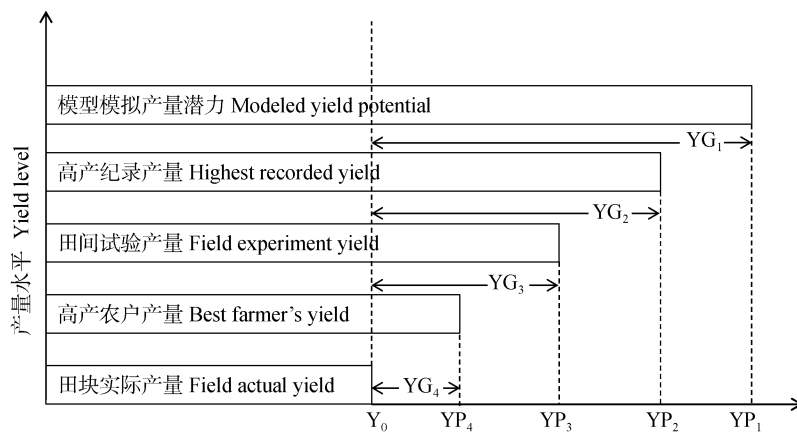


图 1 产量水平、潜在产量和产量差层次示意图

Fig. 1 Conceptual view of yield levels, potential yields (YP) and yield gaps (YG)

#### 1.1.2 国际作物产量差研究历史与冬小麦产量差研究进展

粮食作物产量差研究最早起始于 1974 年国际水稻研究所(International Rice Research Institute, IRRI)对亚洲水稻(*Oryza sativa*)产量差的研究, 其研究成员 Gomez 于 1977 年提出产量差(yield gaps)初步概念, IRRI 研究成员 Barker 等于 1979 年系统阐释了产量潜力和产量差的概念; 荷兰人 Fresco 于 1984 年

扩展了产量差概念模型及相应农业系统研究范围; de Bie 于 2000 年将产量差分为模拟产量差、试验站产量差和农田产量差 3 种<sup>[15]</sup>。2009 年, Lobell 将产量潜力定量总结为模型模拟产量、高产纪录产量、试验产量(试验站产量、区域试验产量、田间试验产量)和高产农户产量(产量前 5% 或 10% 的农户平均产量)等<sup>[14]</sup>; 2010 年, Fischer 等<sup>[16]</sup>提出可开发产量差, 增加了可获得产量(attainable yield)概念。

此后,现代各级产量差层次内涵基本形成,产量差研究在全球兴起,世界主要粮食生产区域和国家的产量差估计和评价概况也在全球产量差地图集 GYGA(<http://www.yieldgap.org>)网站汇总展示,对揭示全球各国粮食作物增产空间、限制因子解析和增产途径开发以确保全球粮食安全发挥着越来越重要的作用。产量差研究手段也不断多样化,如利用遥感数据、卫星数据<sup>[17]</sup>、经济学方法<sup>[18]</sup>等,同时也逐渐融入了资源利用效率差异研究<sup>[7]</sup>。产量差研究尺度也逐渐扩充为地块尺度或农户尺度、地区尺度、国家尺度、地域尺度、全球尺度等<sup>[19-21]</sup>。全球、区域尺度等产量差研究有助于理解多种因子在产量形成中的时空作用及相关性,并可指出产量潜力提升和产量差缩减重点区域,可针对性地提高全球或区域粮食总体产量<sup>[7]</sup>。地区、地块尺度产量差研究进一步量化具体因子在作物产量形成中的作用,对具体途径开发和技术应用具有明显指导作用。除农学外,育种学、社会经济学、环境学、土壤学等多学科加入,使产量差研究不仅可以提示农户在其环境和资源限制条件下获得高产的可能性和增产空间的大小以及如何获得高产<sup>[7]</sup>,而且使缩减农户贫富差距具有可行性<sup>[22]</sup>,使农户从新品种开发中获得的收益最大化。产量差分析方法及时空动态研究还为各国农作物高产研究和政策制定提供了框架手段、方向和技术指导,并带动了多学科的应用性发展,为多国农业发展提供了新的驱动力和空间<sup>[23]</sup>。

2003 年 Bruinsma 首次预估全球小麦产量差较小、玉米产量差较大。全球水稻产量差研究技术系统和方法比较成熟,小麦产量差研究未得到足够重视且研究相对较少。刘保花等<sup>[14]</sup>对 2015 年之前全球小麦产量差 8 项研究进行了汇总,说明冬小麦产量差研究主要分布在欧盟、美国、澳大利亚、西班牙、印度等国家,而在我国和其他国家研究较少。2015 年以后更多国家开始进行冬小麦产量差研究,世界各地冬小麦产量差较大,并提出了对应的多种缩减途径(表 1)。代表性研究结果如下:加拿大亚伯达省雨养冬小麦产量差研究<sup>[24]</sup>表明,管理措施造成的产量差为 24%,品种造成的产量差为 18%,通过品种选择结合优化管理措施可使小麦增产 342 万 t;Deihimfard 等<sup>[25]</sup>研究了伊朗各地冬小麦产量差分布,氮肥因素对产量差贡献可达 40%~47%;Sosibo 等<sup>[26]</sup>研究表明,非洲南部灌溉小麦产量差可通过保护性耕作提高土壤有机质进行缩减,从而增产 26%~38%;Mann 等<sup>[21]</sup>通过融合农户调研、GIS 和遥感等多种手

段研究表明,改善土壤和耕作方式可缩减埃塞俄比亚各地小麦产量差;Gobbett 等<sup>[27]</sup>研究表明,澳大利亚雨养冬小麦产量差为产量潜力的 47%,若通过推广优良品种和优化农艺措施缩减产量差至 20%,可使冬小麦每年增产 1 530 万 t;Hoffmann 等<sup>[28]</sup>对全球可获得产量年际间变化对冬小麦产量差大小的影响进行了研究,结果表明冬小麦产量差大小与实际产量变异关系不大,与资源投入相关性明显,可靠的气候预测可使农户更好地利用资源、降低风险从而缩减农户产量差;Hochman 等<sup>[29]</sup>在澳大利亚通过 APSIM 模型与田间试验数据,分析比较了次优管理措施和最佳管理措施下雨养冬小麦的产量差,表明肥料施用量对产量损失贡献率为 40%,耕作占 33%,杂草控制占 26%,播量占 12%,播期占 7%,采取最优管理措施可提升产量 30%;Schils 等<sup>[7]</sup>利用自下而上的统计学方法和模型模拟方法,研究了欧洲谷物的产量差,发现欧洲国家冬小麦产量差在 10%~70%,可通过提高小麦氮素吸收缩减产量差;Prishchepov 等<sup>[30]</sup>利用贝叶斯网络,研究了俄罗斯西伯利亚粮仓地区肥料、除草剂、新设备应用及小农户培训等因素对冬小麦产量差异的影响,指出加强农户教育和气候智慧型农业可增加冬小麦实际产量;Hatfield 等<sup>[31]</sup>研究表明,全球冬小麦可获得产量随着基因学和农业措施的进步而增长,但冬小麦产量差并未减少甚至扩大,未来小麦生产系统需采取适应气候变化的地方性措施以缩减全球冬小麦产量差;Senapati 等<sup>[1]</sup>通过模拟冬小麦理想型指出,欧洲雨养冬小麦未开发基因产量差仍很大,新品种开发仍是重点。通过以上最新研究可以发现,世界冬小麦产量差研究重要性日益增加,科学家们发现目前冬小麦实际产量仍远远小于其潜在产量,并期望通过冬小麦产量差精准时空分布研究及影响因子细致剖析,为全球小麦产量的持续增长提供必要的预测和技术方案。

### 1.1.3 我国冬小麦产量差研究进展

我国冬小麦产量差研究起步较晚。研究初期,我国科学家多以冬小麦光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力的理论或模型估算为主,发现当地冬小麦实际产量远远达不到理论值。例如,陶志强等<sup>[13]</sup>研究发现河南省 1963—2012 年间冬小麦光温生产潜力为 8 350~9 996 kg·hm<sup>-2</sup>,江苏冬小麦气候生产潜力为 9 991~14 368 kg·hm<sup>-2</sup>,黄淮海冬小麦生产潜力为 6 277~7 044 kg·hm<sup>-2</sup>,农户产量远远低于冬小麦产量潜力。2014 年之前我国冬小麦产量差研究主要集中在华北平原灌溉冬小麦,表明冬小麦

产量潜力和产量差均相对较低, 农户产量已实现了 56%~68% 的产量潜力<sup>[14]</sup>。之后, 更多综合性研究表明我国冬小麦产量差缩减空间仍巨大(表 1)。2014 年 Li 等<sup>[32]</sup>利用 ASPIM 模型, 研究了 1981—2010 年华北平原地区冬小麦产量差时空变化, 指出冬小麦产量差可达产量潜力的 15%~80%, 品种更新和肥料施用等因素导致产量差呈降低趋势; Chen 等<sup>[33]</sup>利用 MCWLA-Wheat 模型, 以县级为单位, 研究了 1981—2008 年华北地区冬小麦产量潜力和产量差, 结果表明大部分地区产量差为产量潜力的 40% 左右, 产量差随着先进管理措施的采纳和科技进步有降低趋势; 马小龙等<sup>[34]</sup>结合农户调查与取样分析, 指出黄土高原旱地低产田块冬小麦平均产量仅实现了高产田块的 43%, 产量差与养分吸收密切相关; Lü 等<sup>[35]</sup>利用 WheatGrow 和 CERES 模型以及 GIS 技术研究表明, 随日照时数增多, 我国冬小麦产量潜力有提高的趋势, 冬小麦产量差幅度也随之扩大; 灌溉水利用效率在山东、四川等地较高, 提高灌溉水利用效率是缩小产量差的可行途径; Zhang 等<sup>[36]</sup>利用逐级修正模型和 GIS 技术研究表明, 热量资源是冬小麦产量主要限制因素, 造成光合潜力产量与光热潜力产量之间的产量差平均值为  $23.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 对中国北部影响大于南方, 充分利用气候资源构建合理冬小麦生产计划可以缩减产量差; 黄少辉等<sup>[12]</sup>在产量差研究中引入了氮肥利用效率差, 指出河北省配方施肥可缩减产量差高达  $3.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; Sun 等<sup>[8]</sup>利用 APSIM 模型和气象数据, 研究了我国冬小麦产量潜力、光热水肥利用效率分布局势及其在各地区的主要影响因子, 表明我国冬小麦当前产量仅为潜在产量的 50%, 我国华北平原及西南地区产量差较高, 缩减产量差才能逆转我国冬小麦产量停滞趋势; 王连喜等<sup>[37]</sup>利用 AEZ 模型, 研究了 1961—2013 年河

南省冬小麦光温生产潜力与农户实际产量差距的时空分布, 表明产量差在各种植区变化趋势不一但均在缩减, 通过在各种植区采取不同农学措施可缩减产量差; 李勤英等<sup>[38]</sup>利用 DSSAT 模型和气象、土壤等数据研究表明, 氮肥用量、播期、土壤养分和播量对降低冬小麦产量差的贡献率分别为 11%~33%、7%~17%、<8% 和 <5%, 但增施氮肥使氮肥利用效率降低; 张玲玲<sup>[39]</sup>利用 APSIM 模型和 ArcGIS 方法, 研究了黄土高原冬小麦产量差时空分布, 分析得出氮素引起产量差平均高达  $3\ 430 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 提高氮肥利用效率是缩减产量差的关键; 王兰<sup>[40]</sup>利用逐级订正法, 研究了山东省小麦-玉米系统产量差大小及时空分布, 指出 1981—2015 年冬小麦品种更替在山东省各地引起的产量差平均为  $5\ 445.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 品种对产量差的影响大于栽培管理措施; Cao 等<sup>[41]</sup>利用边界直线法和路径分析法, 界定了河北冬小麦产量主要限制因子和优化策略, 表明 3 个层级产量差中单位面积穗数有显著差异, 播期、基施氮肥和播量是主要影响因素, 贡献率分别为 26.7%、22.1% 和 14.5%。

由以上研究可见, 最近 5 年我国冬小麦产量差研究主要集中在产量潜力精准评估、产量差限制因子解析、定量及解决途径探索, 研究尺度和范围不断扩充, 研究手段不断丰富, 资源利用效率差异协同研究得到重视, 为冬小麦产量持续增长和政策制定提供了重要信息。然而, 与国际产量差研究相比(表 1), 在欧洲等产量差研究较早、缩减富有成效或已较小的地区, 产量差研究已经朝基因产量差方向研究, 产量上限较高, 并且集中于雨养小麦产量差研究, 而我国产量差上限较低且以灌溉小麦研究居多。因此, 未来我国冬小麦产量差研究还有很大发展空间<sup>[1]</sup>。

表 1 国内外冬小麦产量差研究结果和影响因素及解决对策

Table 1 Research results and limiting factors of winter wheat yield gaps and resolution strategies in China and abroad

研究范围 Research scale	产量差 Yield gap	研究时间 Time	研究方法 Research method	影响因素 Limiting factor	解决对策 Resolution strategy	文献来源 Reference
全球 World	0~24% <sup>[1]</sup>	1961— 2017	数据统计分析 Data statistical analysis	年际间气候变异 Inter-annual climate variation	改善生产系统的气候适应性 Production system improvement for climate resilience	[31]
全球 World	16%~80%	1981— 2010	作物模型 Crop model	资源投入、科技水平、气候变化 Resource input, technology level, climate change	气候预测以优化资源投入 Climate prediction to optimize resource input	[28]
欧洲 Europe	3.5~5.2 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	1981— 2010	Sirius 模型 Sirius Model	品种 Variety	理想型开发 Ideotype development	[1]
欧洲 Europe	0.2~6.9 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	1992— 2015	GYGA 方法 GYGA method	小麦氮素吸收 Nitrogen uptake of wheat	提高小麦氮素吸收 Improving nitrogen uptake by wheat	[7]
加拿大亚伯达省 Alberta, Canada	1.48 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	2005— 2014	试验数据统计分析 Experiment data statistical analysis	管理措施、品种 Management, variety	品种选择结合优化管理 Variety selection and management optimization	[24]

续表 1

研究范围 Research scale	产量差 Yield gap	研究时间 Time	研究方法 Research method	影响因素 Limiting factor	解决对策 Resolution strategy	文献来源 Reference
澳大利亚 Australia	2.0 t·hm <sup>-2</sup>	1996— 2010	GYGA 方法 GYGA method	降雨量、气候、技术采纳 Rainfall, climate, technology adoption	促进农户决策与风险应对 Facilitating farmer decision-making and risk response	[27]
澳大利亚 Australia	3.42 t·hm <sup>-2</sup>	1972— 2015	APSIM 模型与田间试验 APSIM model and field experiment	肥料、耕作、杂草、播量、播期等 Fertilizer, tillage, weeds, seeding rate and date, etc.	采取最优管理措施 Adopting optimized management measures	[29]
俄罗斯西伯利亚 Siberian, Russia	2.3 t·hm <sup>-2</sup>	2012— 2016	贝叶斯网络 Bayesian network	肥料、新设备应用、政策、土壤等 Fertilizer, new equipment application, policy, soil, etc.	气候智慧农业、农民教育 Climate-smart agriculture, farmer education	[30]
伊朗 Iran	5.2 t·hm <sup>-2</sup>	1987— 2011	APSIM 模型 APSIM model	氮肥因素、水分因素 Nitrogen fertilizer, water	优化施肥等管理措施 Optimization of management measures such as fertilization	[25]
非洲南部 South Africa	1.58~3.13 t·hm <sup>-2</sup>	2009— 2016	田间试验数据统计分析 Field experiment data statistical analysis	耕作、土壤 Tillage, soil	改善保护性耕作 Conservation tillage improvement	[26]
埃塞俄比亚 Ethiopian	14.2%~90.4%	2011— 2013	农户调研、GIS 和遥感等 Farm household research, GIS and remote sensing, etc.	管理技术、气候、政策等 Management technique, climate, policy, etc.	田间调查结合空间数据确定管理优先措施 Identify management measure priority by field survey and spatial data	[21]
中国 China	23.2 t·hm <sup>-2</sup>	2000— 2010	逐级修正模型和 GIS 技术 Gradually descending model and GIS technology	热量资源 Thermal resource	利用气候资源构建冬小麦生产计划 Using climatic resource to develop winter wheat production plan	[36]
中国 China	53~3 124 kg·hm <sup>-2</sup>	1990— 2015	DSSAT 模型和气象、土壤等数据 DSSAT model and data on meteorology, soil, etc.	氮肥量、播期、土壤养分、播量等 Nitrogen amount, sowing date, soil nutrient, sowing rate, etc.	调整氮肥和播期 Nitrogen and sowing date adjustment	[38]
中国 China	382~7 515 kg·hm <sup>-2</sup>	1998— 2008	WheatGrow 和 CERES 模型以及 GIS 技术 WheatGrow, CERES models and GIS technology	日照时数、灌溉 Sunshine hour, irrigation	提高灌溉水利用效率 Increasing irrigation use efficiency	[35]
中国 China	41%	1980— 2010	APSIM 模型和气象数据 APSIM model and meteorology data	农艺措施 Agricultural measures	优化农艺措施, 增加低产地区投资 Optimizing agricultural measure, adding input on low yield area	[8]
华北 North China	1.14~6.81 t·hm <sup>-2</sup>	1981— 2010	ASPIM 模型 APSIM model	品种、肥料 Variety, fertilizer	品种更新 Variety refresh	[32]
华北 North China	0.5~1.5 t·hm <sup>-2</sup>	1981— 2008	MCWLA 模型 MCWLA model	管理、科技进步 Management, technology advance	采纳先进管理措施 Adopting advanced management measures	[33]
河北 Hebei	814~2 493 kg·hm <sup>-2</sup>	2014— 2016	边界直线法和路径分析法 Boundary line approach and path analysis	播期、基施氮肥和播量等 Sowing date, basal nitrogen fertilizer and sowing rate	优化播期播量和养分管理 Optimizing sowing date and rate, and nutrient management	[41]
河北 Hebei	3.86 t·hm <sup>-2</sup>	2006— 2013	田间试验数据统计分析 Field experiment data statistical analyze	肥料 Fertilizer	配方施肥 Formulated fertilizer	[12]
山东 Shandong	5 445.5 kg·hm <sup>-2</sup>	1981— 2015	逐级订正法 Step-by-step correction method	品种、栽培管理措施 Variety, cultivation management	品种更替 Variety turnover	[40]
河南 Henan	3.06~5.58 t·hm <sup>-2</sup>	1961— 2013	AEZ 模型 AEZ model	种植区光温时空分布 Spato-temporal light and temperature distribution	在各种植区采取不同农学措施 Adopting different agricultural measures	[37]
黄土高原 Loess Plateau	32%~57%	2014— 2016	农户调查与取样分析 Farmer survey and sampling analysis	养分吸收 Nutrient uptake	优化肥料投入 Optimizing fertilizer input	[34]
黄土高原 Loess Plateau	3 430 kg·hm <sup>-2</sup>	1961— 2016	APSIM 模型和 ArcGIS 方法 APSIM model and ArcGIS method	氮肥、水分 Nitrogen fertilizer, water	提高氮肥利用效率 Improving nitrogen use efficiency	[39]

1)%表示产量差大小为占潜在产量的百分比。1) “%” indicates the proportion of yield gap value in potential yield.

### 1.2 冬小麦资源利用效率差异研究进展

冬小麦产量差异存在的同时必然伴随着冬小麦资源利用效率的差异。冬小麦生产可利用的农业资源主要包括光、热、水、肥等生产要素。冬小麦资源利用效率由低水平向高水平的提升不仅可以节约农业生产成本,更可以在保护环境资源的背景下稳定和增加冬小麦产量,也可以增加冬小麦应对不利气候因素的能力。因此,研究冬小麦资源利用效率差异及其与产量差异之间的关系,能够明确我国冬小麦生产从高投入高产向低投入高产模式转变的可能及途径。

#### 1.2.1 冬小麦光能利用效率差异

冬小麦通过冠层叶片光合作用将太阳光能转化为生物量,其中一部分生物量形成籽粒产量。冬小麦早期育种提高籽粒产量的途径主要是增加生物量,之后绿色革命提升冬小麦籽粒产量的机理主要是提高了收获指数和同化物向籽粒的转运。目前,粮食作物收获指数已达最佳极限 0.6 左右,优化潜力较小<sup>[42]</sup>。因此,再次通过提高冬小麦叶片对太阳辐射的利用效率增加籽粒产量,成为重要途径。

光能利用率(light energy use efficiency, LUE)起初被定义为单位面积太阳总辐射生产出的冬小麦干物质或籽粒所含能量<sup>[43]</sup>。太阳辐射中能被绿叶作物

利用的部分称为光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR),是指在太阳辐射中波长为 400~700 nm 的可见光,约占太阳辐射的 50%<sup>[44]</sup>。辐射利用效率(radiation use efficiency, RUE)是指冬小麦叶片截获的单位 PAR 所产生的干生物量或籽粒产量,是冬小麦转化截获的辐射为生物量的能力。因此,LUE 和 RUE 常被用来评价冬小麦对光能的利用能力。冬小麦能否有效利用太阳光能,是造成冬小麦产量差异的根本原因<sup>[45]</sup>。粮食作物生物量 LUE 理论值为 5%~6%。目前,我国小麦生物量 LUE 一般为 1%~2%<sup>[45]</sup>,冬小麦 RUE 潜力为 2.3~8.6 g·MJ<sup>-1</sup><sup>[44]</sup>。我国各地冬小麦 LUE 和 RUE 存在较大的差异(表 2)。例如,张黛静等<sup>[46]</sup>研究表明,河南中部、北部地区冬小麦生物量 LUE 最高值分别为 2.58%和 2.75%,冬小麦品种不同影响其 LUE 大小从而导致产量差异;周宝元等<sup>[45]</sup>研究表明河南冬小麦-夏玉米系统中冬小麦籽粒产量 LUE 为 0.7%左右;此外,提高冬小麦 RUE 或缩减 RUE 差异可缩减冬小麦产量差异。Ali 等<sup>[47]</sup>研究表明冬小麦灌浆期 RUE 差异解释了 70%的产量差;冬小麦 RUE 与冠层截获光合有效辐射量和冠层辐射截获率呈正比,合适的冠层结构及群体叶面积指数,利于冬小麦冠层截获或吸收更多的光合有效辐射,从而提高冬小麦生物量和籽粒产量<sup>[48]</sup>;

表 2 冬小麦光能利用效率或辐射利用效率研究结果与影响因素

Table 2 Research results and limiting factors of light use efficiency (LUE) or radiation use efficiency (RUE) of winter wheat

研究区域 Research location	研究时间 Research period	光能利用效率或辐射利用效率 Light use efficiency (LUE) or radiation use efficiency (RUE)	影响因素 Influencing factor	参考文献 Reference
美国 United States	2004—2006	RUE 3.35~3.78 g·MJ <sup>-1</sup>	播种管理 Sowing management	[52]
北京 Beijing	2014—2016	RUE 1.42~2.00 g·MJ <sup>-1</sup>	播种模式 Sowing pattern	[49]
河北 Hebei	2008—2009	籽粒 LUE 0.51%~0.75%; 生物量 LUE 1.16%~1.35% Grain LUE 0.51%~0.75%; biomass LUE 1.16%~1.35%	种植密度 Plant density	[50]
河南 Henan	1983—2007	籽粒 LUE 0.21%~0.55% Grain LUE 0.21%~0.55%	积温等气候变化 Change of climate such as accumulated temperature	[43]
河南 Henan	1981—2016	籽粒 LUE 0.20%~0.31% Grain LUE 0.20%~0.31%	积温、降水等气候因素 Climate factors such as accumulated temperature, precipitation, etc.	[53]
河南 Henan	2013—2014	籽粒 LUE 0.59%~0.89%; 生物量 LUE 2.03%~2.75% Grain LUE 0.59%~0.89%; biomass LUE 2.03%~2.75%	品种 Variety	[46]
河南 Henan	2011—2015	籽粒 LUE 0.70%~0.74%; 生物量 LUE 1.49%~1.62% Grain LUE 0.70%~0.74%; biomass LUE 1.49%~1.62%	种植模式 Planting pattern	[45]
陕西 Shaanxi	2015—2017	RUE 2.76~3.55 g·MJ <sup>-1</sup>	水分 Water	[48]
陕西 Shaanxi	2015—2017	RUE 0.2~2.4 g·MJ <sup>-1</sup>	耕作方式、灌溉管理 Tillage, irrigation management	[47]



灌溉、氮肥施用量、秸秆还田、种植密度、种植模式、播期播量、品种、栽培管理措施等因素影响冬小麦冠层结构、单位叶面积含氮量和群体叶面积指数等形态或生理性状,从而影响冬小麦光合有效辐射截获和 RUE<sup>[46-47,49-52]</sup>;温度、土壤状况等因素影响冬小麦叶片蒸腾速率及饱和水汽压,从而影响冬小麦 RUE<sup>[48]</sup>。因此,进一步量化研究冬小麦 LUE 或 RUE 差异时空分布及缩减措施,提高我国冬小麦光能利用效率,是充分利用我国冬麦区光资源以提高作物产量的目标之一。

### 1.2.2 冬小麦热量利用效率差异

大气温度是影响冬小麦生长和发育的主要因子之一,热量是冬小麦光合作用及籽粒产量形成的基础<sup>[54]</sup>。在生产实践中,冬小麦生物学下限温度为 0<sup>[45]</sup>、3<sup>[43]</sup>或 5<sup>[54]</sup>,在这个温度之下小麦基本停止生长和发育。另外,各地实际生产中冬小麦生物学上限温度为 30<sup>[43]</sup>、34<sup>[55]</sup>或 37<sup>[56]</sup>,高于该温度冬小麦也无法正常生长和发育。1735 年法国人 Réaumur 最先提出积温概念,定义为作物整个生育期内温度累积值,第一次将气候温度与作物发育联系起来,指出作物要求一定的温度累积才能完成某个生育进程<sup>[56]</sup>。后来 Monteith 提出生长度日(growing degree days, GDD, °C·d),用以衡量作物生长发育所需热量资源和条件,冬小麦在全生育期必须满足 1 850~2 450 °C·d 的生长度日<sup>[57]</sup>。河南、山东、天津等地冬小麦出苗积温( $\geq 0$  °C)需分别满足 110~120 °C·d、118.5~169.5 °C·d、125~135 °C·d,冬小麦对不同积温条件的利用会影响冬小麦群体的形态生长<sup>[56]</sup>。

热量利用效率(heat utilization efficiency, HUE)是用来评价冬小麦利用热量资源效率的指标,一般是指单位生长度日所生产的单株生物量[单株水平,单位为  $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot(\text{°C}\cdot\text{d})^{-1}$ ]或群体籽粒产量[群体水平,单位为  $\text{kg}\cdot(\text{°C}\cdot\text{d}\cdot\text{hm}^2)^{-1}$ ]<sup>[54]</sup>。冬小麦对当地热量条件的有效利用是实现籽粒产量潜力和高产的重要前提。世界范围内包括我国冬小麦 HUE 差异较大。1983—2007 年河南北部地区冬小麦 HUE 为 1.9~4.3  $\text{kg}\cdot(\text{°C}\cdot\text{d}\cdot\text{hm}^2)^{-1}$ <sup>[43]</sup>。黄淮海南部地区冬小麦-夏玉米系统中冬小麦 HUE 为 3.5~3.8  $\text{kg}\cdot(\text{°C}\cdot\text{d}\cdot\text{hm}^2)^{-1}$ <sup>[45]</sup>。河南省各地冬小麦 HUE 为 1.3~2.8  $\text{kg}\cdot(\text{°C}\cdot\text{d}\cdot\text{hm}^2)^{-1}$ <sup>[53,58]</sup>。以上研究均表明我国热量丰富地区冬小麦 HUE 较小,提升潜力巨大。调整播期、灌溉制度、种植模式和耕作模式等因素能提高冬小麦 HUE<sup>[45,53,59]</sup>。因此,明确我国各地热量利用效率时空分布、影响因素及与

冬小麦产量之间的关系,对气候变化背景下充分利用光热资源以提高我国冬小麦产量至关重要。并且,提升光热等自然资源利用效率,还可减少水、肥等其他资源的投入<sup>[45]</sup>。

### 1.2.3 冬小麦氮肥利用效率差异

氮素是冬小麦生长发育所必需的大量营养元素之一。我国是全球氮肥生产量和消费量最大的国家<sup>[6]</sup>。然而,我国农用氮肥施用量情况严重,施用量远远超过了冬小麦的生长需求量,这不仅导致氮肥利用效率逐年降低,增加了冬小麦生产成本,更是造成了极大的环境污染问题,如土壤养分失衡、水体富营养化、氮素淋失、温室气体排放及土壤酸化等,严重威胁了农业生态环境和冬小麦绿色、高效和可持续发展<sup>[60-61]</sup>。我国不同地区冬小麦氮肥施用量农户间差异较大,尤其是冬小麦主要生产地区,山东省农户平均施氮量为 424  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,河南省农户施氮量平均为 234  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[62]</sup>,河北省农户氮肥用量为 205.6~335.2  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[12]</sup>,陕西省渭北旱塬冬小麦施氮量为 188.0~206.4  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,关中平原冬小麦施氮量为 184.1~213.7  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,均远高于发达国家如法国、丹麦冬小麦施氮量(50  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和 150  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )<sup>[63]</sup>。人为施用氮肥仅不足 50%被冬小麦吸收利用<sup>[64]</sup>。因此,我国各地区适度减施氮肥和增加冬小麦氮肥吸收利用效率成为当前冬小麦增产增效的必须手段。

国际上,氮肥利用效率定量指标主要有氮肥农学效率(nitrogen agronomic efficiency,  $\text{AE}_N$ )、氮肥吸收利用效率(nitrogen recovery efficiency,  $\text{RE}_N$ )、氮肥生理利用率(nitrogen physiological efficiency,  $\text{PE}_N$ )和氮肥偏生产力(partial factor productivity of applied N,  $\text{PFP}_N$ )等<sup>[62]</sup>。目前,我国氮肥施用量导致土壤和环境氮供应量大,氮肥增产效率下降,  $\text{PFP}_N$  可以反映土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应,是评价肥料氮利用效率的最佳指标,应用最为广泛<sup>[64]</sup>(表 3)。国际上认为冬小麦等谷物  $\text{PFP}_N$  目标值为 40.0~70.0  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,2001—2005 年我国小麦  $\text{PFP}_N$  平均为 43.0  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,提升空间仍很大<sup>[65]</sup>。减少施氮量可提高  $\text{PFP}_N$ 、降低氮淋失和保持产量稳定<sup>[61,63]</sup>。优化水肥管理可提高  $\text{PFP}_N$ <sup>[66]</sup>。黄少辉等<sup>[12]</sup>研究表明,通过测土配方施肥可缩减  $\text{PFP}_N$  差异,同时使冬小麦增产。Lü 等<sup>[64]</sup>研究表明,陕西关中平原冬小麦若采用最优施氮量 175  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,相应产量为 6 799  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{PFP}_N$  可提高至 63.9  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,比普通农户提高了 74%。Liu 等<sup>[60]</sup>研究表明,山东省冬小麦采取较优施

氮量  $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{PFP}_\text{N}$ 可增加 63%, 温室气体排放降低, 环境和经济效益均提升。姜瑛等<sup>[62]</sup>研究表明, 河南省不同品种冬小麦产量与  $\text{PFP}_\text{N}$  呈显著正相关。江东国等<sup>[67]</sup>研究表明, 安徽省稻茬小麦晚播条件下

最佳施氮量为  $180\sim 270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 品种与施氮量共同影响  $\text{PFP}_\text{N}$ 。Chen 等<sup>[68]</sup>研究表明, 通过土壤-作物综合管理系统可显著提升冬小麦  $\text{PFP}_\text{N}$ , 并减少活性氮损失和温室气体排放对环境的破坏。

表 3 我国冬小麦氮肥偏生产力研究结果及影响因素

Table 3 Research results and influencing factors of partial factor productivity of applied N ( $\text{PEP}_\text{N}$ ) of winter wheat in China

研究范围 Research location	研究时间 Research period	氮肥偏生产力及差异 $\text{PEP}_\text{N}$ and difference ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	影响因素 Influencing factor	参考文献 Reference
中国 China	2009—2012	28, 41~44	土壤、管理措施 Soil, management measure	[68]
河北 Hebei	2001—2005	36.1	肥料管理 Fertilizer management	[65]
河北 Hebei	2011—2014	20.8~43.1	土壤、种植技术、田间管理 Soil, planting technology, field management	[12]
河南 Henan	2012—2014	4.9~23.3	水肥管理 Water and fertilizer management	[66]
河南 Henan	2017—2018	19.84~50.21	品种 Variety	[62]
山东 Shandong	2009—2016	24~42	氮肥管理 Nitrogen management	[60]
安徽 Anhui	2016—2018	14.67~38.92	播期、品种、氮肥管理 Sowing date, variety, nitrogen management	[67]
陕西 Shaanxi	2009—2013	20.0~36.8	肥料管理 Fertilizer management	[63]
陕西 Shaanxi	2005—2012	36.8~63.9	最优氮肥管理 Optimal nitrogen management	[64]
黄土高原 Loess Plateau	2008—2014	29.5~74.1	水分、氮肥管理 Water, nitrogen management	[61]

以上研究结果(表 3)表明, 我国冬小麦  $\text{PFP}_\text{N}$  差异较大, 与目标值差距也很大。选育推广氮素利用效率高的优良冬小麦品种可使  $\text{PFP}_\text{N}$  和产量协同增加, 优化水肥等管理可使优良品种在稳产的同时提高冬小麦  $\text{PFP}_\text{N}$ 。然而, 其他因素与冬小麦  $\text{PFP}_\text{N}$  关系仍然并不明确, 冬小麦  $\text{PFP}_\text{N}$  时空差异研究仍较缺乏。因此, 今后研究重点仍是分析并找出各地区冬小麦优良品种最适施氮水平、提高施用氮肥被冬小麦回收利用效率、探索缩减氮肥利用效率差异的综合管理措施, 在氮肥施用零增长甚至减量施用的同时保证冬小麦产量持续增加, 是目前农业绿色可持续发展的必然途径<sup>[60]</sup>。

#### 1.2.4 冬小麦水分利用效率差异

水分是冬小麦产量形成所依赖的重要因素之一。我国淡水资源严重短缺, 仅为世界人均占有量的 1/4, 农业灌溉用水占比高达 90%。世界各国地下水位逐年下降, 灌溉用水压采, 对灌溉用水利用效率提出了更严峻的要求<sup>[69-70]</sup>。水分利用效率(WUE)是衡量冬小麦生物积累量与耗水量关系的一个重要指标。群体 WUE 为田间冬小麦群体生物学产量或籽粒产量与群体总耗水量之比, 是冬小麦节水高效研究的通用指标。高 WUE 对我国冬小麦可持续高产至关重要, 尤其是对我国干旱半干旱冬小麦生产区<sup>[71]</sup>。

目前冬小麦区域 WUE 差异研究较少, 主要集中在区域 WUE 大小的研究上(表 4), 与产量差定量关系研究仍缺乏。世界范围内冬小麦籽粒产量 WUE

差异平均可达  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 为 WUE 潜力值的 50%, 在西欧和南美地区 WUE 差异为 30%左右, 而在非洲地区 WUE 差异可达 70%以上, 农户冬小麦 WUE 实际值远小于冬小麦 WUE 潜力值<sup>[70]</sup>。冬小麦 WUE 受多种环境因素和栽培管理措施的影响而有所差异, 比如土壤状况、肥料施用情况<sup>[72]</sup>、叶片气孔导度、光合速率和蒸腾速率等。减少灌溉次数使土壤水分适度亏缺可调节根系生长和冠层形态, 提高土壤贮水能力和冬小麦 WUE, 使冬小麦在获得相对高产  $8.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的同时达到高 WUE( $2.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[73]</sup>。优化灌溉制度可使冬小麦在取得  $9.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  高产的同时具有高 WUE( $2.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[71]</sup>。有限灌溉、适时灌溉、土壤耕作管理和更新品种可提高冬小麦 WUE<sup>[70]</sup>。因此, 在保证高产稳产的同时提高冬小麦 WUE 具有极大的潜力和空间。未来可继续探索我国各地冬小麦水分利用效率差异时空分布、与产量差关系及缩减途径, 对我国淡水资源安全保障有重要意义。

## 2 冬小麦产量差和资源利用效率差异形成机理

冬小麦产量形成主要是受遗传因素和环境因素的共同影响, 人为管理因素可以调节环境因素对产量形成过程的影响及遗传因素对环境因素的适应和利用。前人研究(表 1)表明, 影响冬小麦产量差异和效率差形成的主要因素有品种、气候、土壤、人为管理措施和技术因素, 以及农户决策因素。

表 4 冬小麦水分利用效率研究结果及影响因素  
Table 4 Research results and influencing factors of water use efficiency of winter wheat

研究范围 Research location	研究时间 Research period	水分利用效率 Water use efficiency (kg·m <sup>-3</sup> )	影响因素 Influencing factor	参考文献 Reference
全球 World	2010—2014	0.31~2.04	管理措施 Management measure	[69]
河北 Hebei	2013—2015	1.70~2.49	灌溉次数等管理措施 Management measure such as irrigation times	[73]
河南 Henan	2014—2016	1.59~2.02	灌溉制度等管理措施 Management measure such as irrigation system	[71]
黄土高原 Loess Plateau	2011—2015	1.70~3.40	氮肥管理 Nitrogen management	[72]
黄淮海地区 Huang-Huai-Hai Region	1980—2017	1.09~2.06	品种、灌溉、土壤耕作等 Variety, irrigation, soil tillage, etc.	[70]

## 2.1 品种因素

自绿色革命以来,品种因素对冬小麦产量影响巨大,品种更新导致的全球小麦总体产量的增加量平均每年可达产量潜力的1%<sup>[1]</sup>。1950—2012年间品种改良使我国小麦总体产量每年增加57.5 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[74]</sup>。然而,随着新品种产量潜力的增加,冬小麦产量差异并未改变。这是由于不同品种在不同地区的适应性差异较大<sup>[75]</sup>,品种对各种种植系统和管理系统的反应不同,并且农民对品种实地应用的知识有限,导致田间生产采用的小麦品种多、杂、乱,从而导致各种产量层次差异的产生<sup>[76]</sup>。在我国山东省品种更替引起的冬小麦产量差多年平均值为5 445.5 kg·hm<sup>-2</sup>,影响率可达26.6%<sup>[40]</sup>。在全球冬小麦产量较高的欧洲国家,雨养冬小麦基因产量潜力为11~13 t·hm<sup>-2</sup>,改善冬小麦花后耐热性或抗旱性、冠层结构和物候性、根系吸水能力和延缓干旱下叶片衰老是主要品种性状改良目标<sup>[1]</sup>。不同品种冬小麦氮肥利用效率差异也较大<sup>[62]</sup>。因此,品种潜力的发挥必须与高产栽培技术相配套,尤其是提升高产品种和高资源利用效率品种在次优环境中产量潜力的发挥。

## 2.2 气候因素

气候因素主要指温度、降水、日照时间和太阳辐射、CO<sub>2</sub>浓度等环境因素。气候因素造成的冬小麦产量差主要体现在年际间产量差异和不同气候区域间产量差异。在世界各国小麦高产粮仓地带,气候变化可导致大于36%的冬小麦产量变异<sup>[77]</sup>。建立与气候相适应的种植分布格局、播期播量等栽培管理措施,可缩小冬小麦产量差异和资源利用效率差异<sup>[9,53]</sup>。

温度是冬小麦产量变异的主要影响因子,1980年以来全球冬小麦因平均温度升高导致产量净下降高达5.5%,可能是由于极端高温增加会导致小麦生长季变短从而影响小麦产量<sup>[78]</sup>。1979—2000年中国气温每上升1℃,小麦产量下降3%~10%,

预计到2100年单独因热量效应的增加导致中国冬小麦减产的可能性为80%<sup>[79]</sup>。黄淮海平原升温对冬小麦产量的影响具有时空差异性<sup>[80]</sup>,全球高纬度地区冬小麦产量受温度影响高于低纬度地区<sup>[81]</sup>,从而导致年际间或地域间的产量差的形成。另外,极端天气如冬季冻害、夏季热干风也会造成冬小麦产量差的形成。

降水是影响冬小麦不同产量形成的主要因素之一。降雨量与小麦产量基本上呈正相关,冬小麦产量差与冬小麦灌浆期降雨量密切相关<sup>[82]</sup>。降水存在明显的时空差异<sup>[83]</sup>。如果生长季节供水充分,如澳大利亚西部小麦季节水分供应在250 mm以上时,降水量不再是产量的限制因子<sup>[84]</sup>。近年来,黄淮海冬麦区温度升高,降水量减少,干旱对冬小麦产量的影响程度加大,导致灌溉用水科学管理对产量的影响日益重要。相比于品种,产量增加与水肥的联系更加紧密<sup>[85]</sup>。冬小麦雨养产量差及降雨利用效率差异研究是关注降水影响最多的研究<sup>[69]</sup>。

另外,小麦产量与太阳辐射呈正比,太阳辐射的减少会导致小麦减产6%~8%<sup>[86]</sup>。各地区日照时数和日温差与冬小麦籽粒产量呈正相关,日照时数和日温差的不同变化影响冬小麦产量差异<sup>[87]</sup>。由于太阳辐射和日照时数的改变影响了小麦的光合有效辐射和叶温,从而影响了其干物质积累、分配及品质形成的过程,导致小麦产量的变化。

## 2.3 土壤因素

土壤是冬小麦生产的最重要基础因素,耕层土壤结构和土壤质量决定了冬小麦地下部根系的发育程度以及对地上部生产力的支撑程度,优化土壤结构和提高土壤质量是全球主要作物实现增产潜力的主要途径之一<sup>[88]</sup>。中国耕地土壤质量深刻影响着农业的过去、现在和未来。耕层土壤质量要素包括耕层厚度、土壤含水量、土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾和其他微量元素等。耕层厚度增加能提高土壤有机质和养分含量<sup>[89]</sup>。我国耕地表层土

壤厚度在下降, 耕地表层土壤有机质含量也仅为  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右, 而欧美等国家为  $25 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[90]</sup>。施用有机肥和秸秆还田可改善土壤肥力和提高土壤养分, 能显著提高冬小麦产量<sup>[38,63]</sup>。我国耕地面积大小和土壤质量不一以及农户整地措施不一致, 导致农户肥料利用效率及冬小麦籽粒产量差异巨大。较优的耕作措施和轮耕系统可以改善土壤结构及整地质量, 提升土壤质量及土壤储水供水功能, 促进土壤微生物与冬小麦植株良性互作, 可以更好地发挥出冬小麦产量的生理潜力<sup>[91-92]</sup>。土壤覆膜技术可以提高冬小麦产量及水氮利用效率, 尤其是低投入农业地区和干旱地区<sup>[93]</sup>。由于产量变异受土壤、土壤管理技术及其互作作用的影响, 有学者提出耕地生产潜力的概念, 来研究耕地质量对冬小麦产量差影响的大小, 以期通过改善耕地结构和质量, 达到良好的土地利用效益<sup>[10]</sup>。同时, 构建富有生产力且质量均衡的耕层, 可驱动冬小麦产量差与效率差的缩小, 达到冬小麦稳产增效目的。目前与土壤限制因素有关的产量差研究主要集中在水分限制产量差、养分限制产量差和土壤限制产量差等, 并且关注与农户管理措施和科学技术的相关性。

#### 2.4 人为管理措施和技术因素

人为栽培管理包括种植制度、播种方式、机械化程度、播期、播量、整地方式、植保管理、养分肥料管理(肥料种类、施肥时间、施肥方式、施肥量、施肥次数、土壤肥力等)、灌溉技术管理(灌溉设施、灌溉方式、灌溉时间、灌溉次数、灌溉量等), 以及农田管理(草虫害及施药管理、田块大小管理、投入大小、栽培技术应用选择等)等因素, 这些因素也极大地影响冬小麦产量差异和资源利用效率的大小<sup>[66,71,94]</sup>。通过改善养分管理和调节灌溉量及灌溉次数, 大部分农作物的产量可能增加  $45\% \sim 70\%$ <sup>[95]</sup>。采用先进农艺措施解除或改善各地限制因素对冬小麦产量差的影响, 优化农业栽培管理措施可基本消除农户冬小麦实际产量与可实现产量的差异<sup>[14]</sup>。在我国华北地区, 提高栽培耕作技术的到位率是缩小冬小麦田块尺度产量差的重要途径<sup>[41]</sup>。如果采用了日益先进的农艺管理措施和技术, 发展中国家冬小麦产量的增长还有很大空间<sup>[96]</sup>。不同的管理措施对产量差影响不同, 这是实践中最难定量的变量因素, 而且各种管理技术的到位率也有较大差异, 但通过细致研究各管理措施因子对产量差的单独影响及组合影响, 将在技术制定中发挥重大作用。其他因素如杂草、病虫害等生物胁迫因素也是产量限制因子,

但均可归纳到管理措施中进行研究, 引起的产量差约占总产量差的 10%, 先进的生物胁迫因子管控技术可以缩减这些限制因子造成的冬小麦产量损失。人为管理措施和技术的研究在于综合多因素的影响, 协调和改善不同冬小麦品种对环境因素的适应性及对环境资源的利用效率, 从而均衡提高冬小麦的总体产量<sup>[14]</sup>。

#### 2.5 农户决策因素

农户决策因素是指能够影响农民采取缩减产量差的农业措施等决策的因素, 主要有社会经济政治因素、景观、生态系统因素、耕作面积等<sup>[97]</sup>。农户也更加注重经济产量。优化农户决策因素是一种缩减产量差更广泛的措施途径, 通过增加农户采取各种技术解决方案的动力和积极性, 使高产高效措施或技术与农民的经济效益相一致, 从而间接缩减产量差, 最终提高冬小麦生产力。社会经济政治因素包括农民自身受教育水平、市场粮食价格、农民收入、农业政策、政府机构支持、作物保险等风险控制措施、耕作面积、农业机械化程度、基础设施的配套程度、农民获取技术的难易程度、生产成本与收益、农业习俗等<sup>[18,96,98]</sup>, 会通过影响农民是否采取缩减产量差的意愿和决策进而间接影响作物产量, 与作物产量之间存在显著的正相关关系<sup>[99]</sup>, 这些因素的实施程度也会影响作物产量差的大小。扩大耕作面积或地块面积, 提升机械化程度等, 会促进作物产量朝着均衡方向发展, 缩小产量差和效率差。

### 3 冬小麦产量差和效率差缩减技术途径研究进展

综合上述研究可知, 影响小麦产量差和效率差的因子是众多而广泛的。深入研究并明确我国各地区重点限制因子的影响, 针对性制定农业技术解决方案, 可有效缩减冬小麦产量差和效率差。除品种开发技术和政策支持外, 目前已有一些冬小麦产量差缩减技术途径在全国各地推广应用(表 5)。

长远上看, 可持续性集约化是我国冬小麦生产发展的方向, 但就目前来说, 我国冬小麦生产仍以小农户为主, 逐步缩减小农户间冬小麦产量差和效率差, 示范推广区域模式化农户通用简化技术方案, 不仅对满足当前小农户农业需求意义重大, 对未来自集约化冬小麦可持续生产也能提供理论依据和技术支撑, 而我国冬小麦在这方面的区域模式化技术方案还很欠缺, 有待于进一步探索和丰富。

表 5 我国冬小麦缩差增效技术途径  
Table 5 Yield gap-closing and resource use efficiency-enhancing technical routes of winter wheat in China

技术分类 Technical classification	技术内容 Technical content	文献来源 Reference
土壤处理技术和耕作技术 Soil treatment and tillage technology	深翻技术 Deep plowing	[100]
	土壤-作物综合管理系统 Integrated soil-crop system management	[68]
	垂直深旋耕技术 Deep vertical rotatory tillage	[101]
播种技术 Seeding technology	立体匀播 Tridimensional uniform sowing	[49]
	垄作、补灌 Ridge-furrow planting, supplemental irrigation	[47]
	起垄覆膜技术 Ridge-furrow mulching technology	[93]
合理灌溉制度 Optimized irrigation system	微喷灌 Sprinkler irrigation	[71]
	滴灌 Drip irrigation	
	测墒补灌 Supplementary irrigation by soil moisture measure	[102]
精准施肥技术 Precision fertilizing technology	测土配方技术 Soil testing and formulated fertilization	[12]
农户合作模式 Farmer cooperation mode	科技小院模式 Science and technology backyard mode	[41]

4 冬小麦产量差和资源利用效率差异及调控技术途径研究发展方向

到 2050 年, 世界发展中国家对小麦的需求将比目前增加 50%~60%。随着全球气温增高、极端气候事件频出、水资源逐渐枯竭、环境恶化及人类对粮食和环境质量要求的提高, 农业绿色可持续发展面临的挑战和威胁不断增多, 缩减已存在的冬小麦产

量差和效率差成为越来越重要的策略和手段。通过各种策略使我国各地冬小麦产量达 70%~80%的产量潜力仍是主要目标<sup>[88]</sup>。同时, 效率差研究及其与产量差的关系研究也需要不断深入和明确。另外, 冬小麦产量差与效率差影响因素复杂, 所需研究方法综合性增强, 多学科数据渗入, 因此, 需要借助现代大数据技术进行全面数据整合、挖掘和应用, 创建区域模式化冬小麦缩差增效技术途径(图 2)。

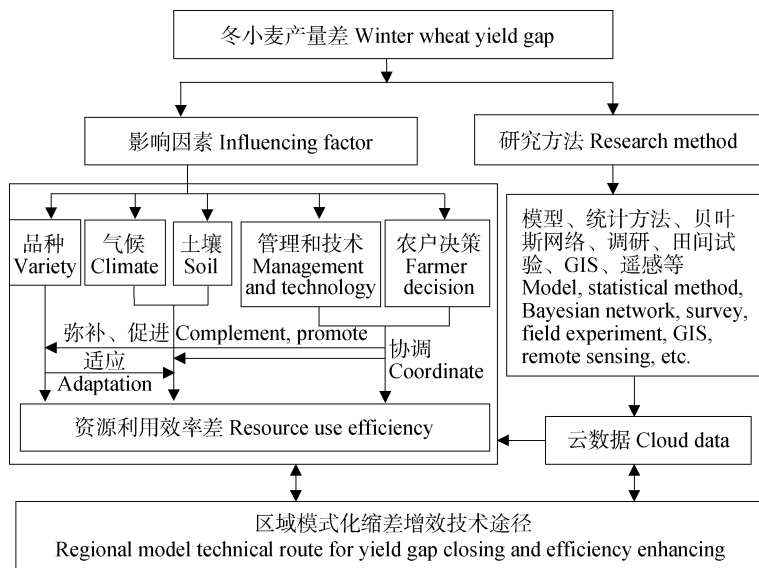


图 2 冬小麦产量差和资源利用效率差异研究路径和关系图  
Fig. 2 Research route and relations of yield gap and resource use efficiency of winter wheat

4.1 建立基于云数据分析的区域化冬小麦产量差和资源利用效率差异智慧调控途径

我国有北部冬麦区、黄淮海冬麦区和长江中下游冬麦区三大冬小麦生态区, 气候类型、自然资源环境差异大, 品种类型明显不同, 因此, 需要制定区域模式化的冬小麦产量差和效率差缩减技术与途

径, 与信息农业紧密结合, 创建基于品种、气候、土壤、人为管理和农户决策五大重要影响因素的农业云数据库, 并不断加强和完善; 利用云数据技术综合性网络化研究冬小麦产量差和效率差, 为区域模式化指导农业政策制定、生产规划及技术途径优化组合奠定基础, 结合遥感、无人机、现代农机等技

术, 发展智慧农业势在必行。目前, 可利用的数据有: 国家统计数据, 全国及各省冬小麦品种区域试验、高产创建、丰产方建设试验数据, 长期定点定位试验监测数据, 全国农情调查农户调查数据, 生物物理性环境数据、土壤数据, 气象数据、卫星、遥感、GIS 数据等。未来将会逐渐增加的数据有: 优良品种适应性等研究数据, 与气候变化相适应的播期播量及产量调查等数据, 农户措施处理信息、农户社会经济条件数据等。还需要多学科紧密结合, 围绕冬小麦产量差和效率差研究, 对云数据库进行模块链分析等, 凝练筛选出小麦产量差和效率差的关键因子, 才能针对性地应用到冬小麦缩差增效智慧农业管理。

#### 4.2 拓展冬小麦轮作系统下产量差和资源利用效率差异及调控途径的研究

我国黄淮海平原是以冬小麦-夏玉米轮作为主, 与大豆(*Glycine max*)、谷子(*Setaria italica*)等作物轮作为辅, 长江中下游麦区大部分都是小麦-水稻轮作为主, 因此, 研究不同生态麦区冬小麦轮作系统下产量差和效率差及调控途径是我国冬小麦产量差和效率差研究的重要方向。目前冬小麦产量差和效率差的单季研究比较多, 而冬小麦与其他作物轮作系统下综合周年产量差和效率差的研究较少, 但综合评价周年系统产量和效率将更符合农户的经济效益和期望, 利于农户决策, 未来必须加强这方面的研究。

#### 4.3 创建区域模式简化冬小麦缩差增效技术途径

我国地域辽阔, 小麦生态环境复杂多样, 也难以形成单一或者少量的标准化缩差增效技术模式用于指导生产。我国已有冬小麦缩差增效措施无法满足我国各地冬小麦产量增长的需求。在一系列国内外冬小麦产量潜力、产量差和效率差的精确定量和空间分布网格化研究的基础上, 从上述五大影响冬小麦产量差和效率差的因素中找出主控因子, 开发因地制宜、优化配套的区域模式化缩差增效简化技术途径, 任务依然艰巨。另外, 我国已有缩差增效技术途径应用到位率不高, 今后应加强冬小麦产量差和效率差及调控途径的深入研究, 并创建出不同区域模式化缩差增效简化技术在不同麦区进行示范推广。冬小麦产量差和效率差缩减技术创建是我国通向精准农业、绿色农业、均衡农业、高产高效农业的必由之路。

### 参考文献 References

[1] SENAPATI N, SEMENOV M A. Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated for wheat in Europe[J].

Global Food Security, 2020, 24: 100340

- [2] BAILEY-SERRES J, PARKER J E, AINSWORTH E A, et al. Genetic strategies for improving crop yields[J]. Nature, 2019, 575(7781): 109–118
- [3] HOCHMAN Z, GOBBETT D L, HORAN H. Climate trends account for stalled wheat yields in Australia since 1990[J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 2071–2081
- [4] LOBELL D B, CASSMAN K G, FIELD C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34(1): 179–204
- [5] FAO. FAOSTAT-agriculture database[EB/OL]. [2019-10-16]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC>
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 地区数据[EB/OL]. [2019-10-16]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical data[EB/OL]. [2019-10-16]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>
- [7] SCHILS R, OLESEN J E, KERSEBAUM K C, et al. Cereal yield gaps across Europe[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 101: 109–120
- [8] SUN S, YANG X G, LIN X M, et al. Winter wheat yield gaps and patterns in China[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(1): 319–330
- [9] 卢燕宇, 孙维, 唐为安, 等. 气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 17–30  
LU Y Y, SUN W, TANG W A, et al. Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 17–30
- [10] 王冲, 张瑞芳, 李旭光, 等. 黑龙江平原东北部小麦、玉米土地生产潜力研究[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(6): 23–29  
WANG C, ZHANG R F, LI X G, et al. Study on the land production potential of wheat and maize in the northeast of Heilongang Plain[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(6): 23–29
- [11] 李国强, 陈丹丹, 张建涛, 等. 基于 DSSAT 模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 507–515  
LI G Q, CHEN D D, ZHANG J T, et al. Quantitative simulation and analysis of winter wheat production potential in Henan Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(4): 507–515
- [12] 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[J]. 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[J]. Crops, 2018, (2): 118–122
- [13] 陶志强, 王德梅, 杨玉双, 等. 北方冬麦区小麦产量潜力及增产技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(2): 48–53  
TAO Z Q, WANG D M, YANG Y S, et al. Yield potential and yield-increasing techniques of winter wheat in northern winter wheat region: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(2): 48–53
- [14] 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[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525–534

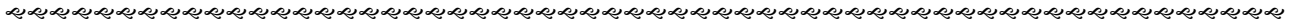
- LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 525–534
- [15] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2731–2741
- YANG X G, LIU Z J. Advances in research on crop yield gaps[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14): 2731–2741
- [16] FISCHER R A T, EDMENDES G O. Breeding and cereal yield progress[J]. Crop Science, 2010, 50(S1): S85–S98
- [17] LOBELL D B. The use of satellite data for crop yield gap analysis[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 56–64
- [18] VAN DIJK M, MORLEY T, JONGENEEL R, et al. Disentangling agronomic and economic yield gaps: An integrated framework and application[J]. Agricultural Systems, 2017, 154: 90–99
- [19] VAN ITTERSUM M K, CASSMAN K G, GRASSINI P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance — A review[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 4–17
- [20] HOCHMAN Z, GOBBETT D, HORAN H, et al. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 97–106
- [21] MANN M L, WARNER J M. Ethiopian wheat yield and yield gap estimation: A spatially explicit small area integrated data approach[J]. Field Crops Research, 2017, 201: 60–74
- [22] ZHANG A R, HOCHMAN Z, HORAN H, et al. Socio-psychological and management drivers explain farm level wheat yield gaps in Australia[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2019, 39(1): 10
- [23] SUMBERG J. Mind the (yield) gap(s)[J]. Food Security, 2012, 4(4): 509–518
- [24] CHAPAGAIN T, GOOD A. Yield and production gaps in rainfed wheat, barley, and canola in Alberta[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 990
- [25] DEIHIMFARD R, MAHALLATI M N, KOOCHEKI A. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan Province, Iran, through crop modelling[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 28–38
- [26] SOSIBO N Z, MUCHAONYERWA P, VISSER L, et al. Soil fertility constraints and yield gaps of irrigation wheat in South Africa[J]. South African Journal of Science, 2017, 113(1/2): 1–9
- [27] GOBBETT D L, HOCHMAN Z, HORAN H, et al. Yield gap analysis of rainfed wheat demonstrates local to global relevance[J]. Journal of Agricultural Science, 2017, 155(2): 282–299
- [28] HOFFMANN M P, HAAKANA M, ASSENG S, et al. How does inter-annual variability of attainable yield affect the magnitude of yield gaps for wheat and maize? An analysis at ten sites[J]. Agricultural Systems, 2018, 159: 199–208
- [29] HOCHMAN Z, HORAN H. Causes of wheat yield gaps and opportunities to advance the water-limited yield frontier in Australia[J]. Field Crops Research, 2018, 228: 20–30
- [30] PRISHCHEPOV A V, PONKINA E, SUN Z L, et al. Revealing the determinants of wheat yields in the Siberian breadbasket of Russia with Bayesian networks[J]. Land Use Policy, 2019, 80: 21–31
- [31] HATFIELD J L, BERES B L. Yield gaps in wheat: Path to enhancing productivity[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1603
- [32] LI K N, YANG X G, LIU Z J, et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 1–12
- [33] CHEN Y, ZHANG Z, TAO F, et al. Spatio-temporal patterns of winter wheat yield potential and yield gap during the past three decades in North China[J]. Field Crops Research, 2017, 206: 11–20
- [34] 马小龙, 王朝辉, 曹寒冰, 等. 黄土高原旱地小麦产量差异与产量构成及氮磷钾吸收利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1135–1145
- MA X L, WANG C H, CAO H B, et al. Yield variation of winter wheat and its relation to yield components, NPK uptake and utilization in drylands of the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1135–1145
- [35] LUY Z F, LIU X J, CAO W X, et al. A model-based estimate of regional wheat yield gaps and water use efficiency in main winter wheat production regions of China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6081
- [36] ZHANG S Y, ZHANG X H, QIU X L, et al. Quantifying the spatial variation in the potential productivity and yield gap of winter wheat in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 845–857
- [37] 王连喜, 卢媛媛, 李琪, 等. 基于 AEZ 模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 547–558
- WANG L X, LU Y Y, LI Q, et al. Spatio-temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(4): 547–558
- [38] 李勤英, 姚凤梅, 张佳华, 等. 不同农艺措施对缩小冬小麦产量差和提高氮肥利用率的评价[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6): 370–379
- LI Q Y, YAO F M, ZHANG J H, et al. Evaluation of different agronomic measures on narrowing the yield gap and improving nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(6): 370–379
- [39] 张玲玲. 黄土高原冬小麦产量差及其水氮利用效率分析[D]. 杨凌: 中国科学院大学, 2019: 119–121
- ZHANG L L. Analysis on yield gaps and its water and nitrogen use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 119–121
- [40] 王兰. 山东省小麦玉米产量差及影响因素研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 17–28
- WANG L. Study on yield gap of wheat and maize and its influencing factors in Shandong Province[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019: 17–28
- [41] CAO H Z, LI Y N, CHEN G F, et al. Identifying the limiting factors driving the winter wheat yield gap on smallholder farms by agronomic diagnosis in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(8): 1701–1713
- [42] REYNOLDS P M, VAN GINKEL M, RIBAUT J M. Avenues for genetic modification of radiation use efficiency in wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(S1): 459–473

- [43] 刘晓迎, 陈罗成, 赵巧梅, 等. 豫北主要农作物光热资源利用效率研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(4): 29–33  
LIU X Y, CHEN L C, ZHAO Q M, et al. Light and heat utilization efficiency of winter wheat and summer maize in northern region of Henan province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(4): 29–33
- [44] ZHU X G, LONG S P, ORT D R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield[J]. Annual Review of Plant Biology, 2010, 61(1): 235–261
- [45] 周宝元, 葛均筑, 侯海鹏, 等. 黄淮海平原南部不同种植体系周年气候资源分配与利用特征研究[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 937–949  
ZHOU B Y, GE J Z, HOU H P, et al. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization for different cropping systems in the south of Yellow-Huaihe-Haihe Rivers Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 937–949
- [46] 张黛静, 陈倩青, 马建辉, 等. 不同冬春性小麦品种在豫中、豫北地区光能利用率及生产潜力比较[J]. 河南农业科学, 2018, 47(8): 17–23  
ZHANG D J, CHEN Q Q, MA J H, et al. Comparison of light use efficiency and production potential of different winter and spring wheat varieties in central and North Henan[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(8): 17–23
- [47] ALI S, XU Y Y, AHMAD I, et al. The ridge-furrow system combined with supplemental irrigation strategies to improves radiation use efficiency and winter wheat productivity in semi-arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 76–86
- [48] 李华龙, 龚子荷, 蒋腾聪, 等. 水分胁迫对冬小麦冠层辐射截获率和利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 226–237  
LI H L, DOU Z H, JIANG T C, et al. Influences of soil water stress on solar radiation interception and use efficiency of winter wheat canopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 226–237
- [49] TAO Z Q, WANG D M, MA S K, et al. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(3): 566–578
- [50] 毕常锐, 白志英, 杨詠, 等. 种植密度对小麦群体光能资源利用的调控效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 171–176  
BI C R, BAI Z Y, YANG H, et al. Effects of planting densities on radiation resource utilization of the wheat colony[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(5): 171–176
- [51] ZHANG Z, ZHOU X B, CHEN Y H. Effects of irrigation and precision planting patterns on photosynthetic product of wheat[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(6): 2322–2328
- [52] HATFIELD J L, DOLD C. Photosynthesis in the solar corridor system[M]//DEICHMAN C L, KREMER R J. The Solar Corridor Crop System. USA: Academic Press, 2019: 1–33
- [53] 徐延红, 李树岩. 气候变化对河南省小麦和玉米气候资源利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 218–225  
XU Y H, LI S Y. Impact of climate change on climatic resources utilization efficiency of wheat and maize in Henan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 218–225
- [54] DAR E, BRAR A S, YOUSUF A. Growing degree days and heat use efficiency of wheat as influenced by thermal and moisture regimes[J]. Journal of Agrometeorology, 2018, 20(2): 168–170
- [55] 石晓丽, 史文娇. 极端高温对黄淮海平原冬小麦产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 259–269  
SHI X L, SHI W J. Impacts of extreme high temperature on winter wheat yield in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(2): 259–269
- [56] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于有效积温的冬小麦返青后植株三维形态模拟[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1594–1605  
LI S Q, ZHU Y P, LIU H L, et al. 3D shape simulation of winter wheat after turning green stage based on effective accumulated temperature[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(9): 1594–1605
- [57] 郑大玮, 孙忠富. 关于积温一词及其度量单位科学性问题的讨论[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 165–169  
ZHENG D W, SUN Z F. Discussion on scientificity problem of accumulated temperature and its unit[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 165–169
- [58] 常清, 王靖, 余卫东, 等. 河南小麦-玉米轮作系统热量利用率时空分布[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1176–1187  
CHANG Q, WANG J, YU W D, et al. Spatiotemporal variation and potential of heat use efficiency of wheat-maize rotation system in Henan Province[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1176–1187
- [59] TOMAR S K, YADAV S K, SINGH D P, et al. Degree days, heat use efficiency and biomass accumulation in wheat under varying growing environments[J]. Ecology, Environment and Conservation, 2016, 22(S1): S449–S454
- [60] LIU Z, YU N N, CAMBERATO J J, et al. Crop production kept stable and sustainable with the decrease of nitrogen rate in North China Plain: An economic and environmental assessment over 8 years[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19335
- [61] YANG X L, LU Y L, DING Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014)[J]. Field Crops Research, 2017, 206: 1–10
- [62] 姜瑛, 戚秀秀, 李祥剑, 等. 不同小麦品种的氮素利用特性研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(6): 702–708  
JIANG Y, QI X X, LI X J, et al. Study on nitrogen utilization characteristics of different wheat cultivars[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(6): 702–708
- [63] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245–253  
ZHAO H B, WANG Z H, GAO Y J, et al. Investigation and evaluation of household wheat fertilizer application in Shaanxi Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 245–253
- [64] LYU F L, HOU M M, ZHANG H T, et al. Closing the nitrogen use efficiency gap and reducing the environmental impact of wheat-maize cropping on smallholder farms in the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(1): 169–178



- [65] 孙彦铭, 黄少辉, 刘克桐, 等. 河北省冬小麦施肥效果与肥料利用率现状[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 60–65  
SUN Y M, HUANG S H, LIU K T, et al. Fertilization effects and fertilizer utilization rates of winter wheat in Hebei Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 60–65
- [66] LIU W X, WANG J R, WANG C Y, et al. Root growth, water and nitrogen use efficiencies in winter wheat under different irrigation and nitrogen regimes in North China Plain[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1798
- [67] 江东国, 黄正来, 张文静, 等. 晚播条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1211–1221  
JIANG D G, HUANG Z L, ZHANG W J, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen uptake and yield of wheat under late sowing conditions after rice[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1211–1221
- [68] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489
- [69] RATTALINO EDREIRA J I, GUILPART N, SADRAS V, et al. Water productivity of rainfed maize and wheat: A local to global perspective[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 364–373
- [70] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454–1464  
ZHANG X Y. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1454–1464
- [71] JHA S K, RAMATSHABA T S, WANG G S, et al. Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 292–302
- [72] WANG L L, PALTA J A, CHEN W, et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 41–53
- [73] XU C L, TAO H B, TIAN B J, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 268–275
- [74] WAN J M. Genetic crop improvement: A guarantee for sustainable agricultural production[J]. *Engineering*, 2018, 4(4): 431–432
- [75] 梁鹏, 石玉, 赵俊晔, 等. 不同产量潜力小麦品种冠层光截获特性及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1189–1194  
LIANG P, SHI Y, ZHAO J Y, et al. Differences of canopy light interception characteristics and yield in different yield potential wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(10): 1189–1194
- [76] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671–674
- [77] RAY D K, GERBER J S, MACDONALD G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5989
- [78] LOBELL D B, SIBLEY A, ORTIZ-MONASTERIO J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 186–189
- [79] YANG X, TIAN Z, SUN L X, et al. The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China[J]. *Climatic Change*, 2017, 140(3/4): 605–620
- [80] LIU Y A, WANG E L, YANG X G, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2287–2299
- [81] XIONG W, ASSENG S, HOOGENBOOM G, et al. Different uncertainty distribution between high and low latitudes in modelling warming impacts on wheat[J]. *Nature Food*, 2020, 1(1): 63–69
- [82] HATFIELD J L, DOLD C. Agroclimatology and wheat production: Coping with climate change[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 224
- [83] ZHANG Q, XIAO M Z, SINGH V P, et al. Spatiotemporal variations of temperature and precipitation extremes in the Poyang Lake basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(3/4): 855–864
- [84] ANDERSON W K. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1/2): 14–22
- [85] SINCLAIR T R, RUFTY T W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics[J]. *Global Food Security*, 2012, 1(2): 94–98
- [86] HERNÁNDEZ-BARRERA S, RODRÍGUEZ-PUEBLA C. Wheat yield in Spain and associated solar radiation patterns[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(S1): 45–58
- [87] ZHANG X Y, WANG S F, SUN H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 52–59
- [88] CASSMAN K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5952–5959
- [89] 韩上, 武际, 夏伟光, 等. 耕层增减对作物产量、养分吸收和土壤养分状况的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 881–887  
HAN S, WU J, XIA W G, et al. Effects of topsoil thickness on crop yields and nutrient uptake as well as soil nutrients[J]. *Soils*, 2018, 50(5): 881–887
- [90] LINDERT P H. Shifting ground: The changing agricultural soils of China and Indonesia[J]. *Soil Science*, 2000, 166(3): 824–825
- [91] KAHN M S, KHURANA K. Effect of land management practices on physical properties of soil and water productivity in wheat-maize system of Northwest India[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017, 15(4): 1–13
- [92] ZHANG L, WANG J, FU G Z, et al. Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198193

- [93] 靳乐乐, 乔匀周, 董宝娣, 等. 起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1364-1374  
JIN L L, QIAO Y Z, DONG B D, et al. Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge-furrow cultivation with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1364-1374
- [94] PONISIO L C, M'GONIGLE L K, MACE K C, et al. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap[J]. Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences, 2015, 282(1799): 7
- [95] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254-257
- [96] GEORGE T. Why crop yields in developing countries have not kept pace with advances in agronomy[J]. Global Food Security, 2014, 3(1): 49-58
- [97] SNYDER K A, MITHTHAPALA S, SOMMER R, et al. The yield gap: closing the gap by widening the approach[J]. Experimental Agriculture, 2017, 53(3): 445-459
- [98] SAMBERG L H, GERBER J S, RAMANKUTTY N, et al. Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(12): 124010
- [99] MARIANO M J, VILLANO R, FLEMING E. Factors influencing farmers' adoption of modern rice technologies and good management practices in the Philippines[J]. Agricultural Systems, 2012, 110: 41-53
- [100] 党建友, 裴雪霞, 张定一, 等. 休闲期深翻时间对旱地麦田土壤水分特性和小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2975-2982  
DANG J Y, PEI X X, ZHANG D Y, et al. Effects of deep plowing time during the fallow period on water storage-consumption characteristics and wheat yield in dry-land soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2975-2982
- [101] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 326-335  
WANG S J, JIANG D H, ZHU W G, et al. Effect of deep vertical rotary tillage on aggregate structure in farmland of lateritic red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 326-335
- [102] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 不同灌溉模式对小麦产量、耗水及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 17-24  
CAO C Y, DANG H K, ZHENG C L, et al. Effects of different irrigation regime on yield, water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(S1): 17-24



## 欢迎订阅 2021 年《中国草地学报》

《中国草地学报》是由中国农业科学院草原研究所和中国草学会共同主办的国家级草学学术期刊, 主要报道中国草学研究领域的新理论与重要成果, 介绍新进展与发展动态, 内容以草学基础理论研究和应用理论研究为主, 兼纳高新技术研究和直接产生生态效益、经济效益的开发性研究, 主要包括草原学、牧草学、草地学和草坪学等学科领域内有关草地与牧草资源、牧草遗传育种与引种栽培、草地经营管理与改良利用、牧草生理生化、草地建设与生态保护、草地生产与饲草料加工调制、草坪绿地、草业经济与可持续发展战略等。栏目主要有“做好草原大文章”、“研究报告”、“综述与专论”、“研究简报”等。

本刊为中国草业领域创办最早的科技期刊, 自 1979 年创刊以来先后荣获内蒙古、中国农业科学院、华北地区和全国农业等优秀期刊或优秀科技期刊奖 9 次, 现为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国农业核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国科学引文数据库来源期刊, 并被《中国知网》、《中国期刊网》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《万方数据—数字化期刊群》、《中文电子期刊资料服务库》、《中国科技论文与引文数据库》等多种数据库及二次文献收录。2019 年复合影响因子 1.756, 综合影响因子为 1.267, 居草业学科期刊的第二位。

《中国草地学报》为双月刊, 大 16 开, A4 版本, 国内外公开发行。国内统一刊号 CN 15 - 1344/S, 国内邮发代号 16 - 32, 全国各地邮局(所)均可订阅, 错过订期可直接向本刊编辑部补订。

地址: 内蒙古呼和浩特市乌兰察布东街 120 号

邮编: 010010; 电话: 0471 - 4928361

电子信箱: zgcdxb@126.com

在线投稿网址: <http://zgcd.cbpt.cnki.net>

微信公众号: 中国草地学报

微信公众号二维码: 见右图

