



潘志华, 黄娜, 陈脩. 气象资源论: 气象对作物生产与社会经济发展作用的新审视[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 299-306.
PAN Zhihua, HUANG Na, CHEN Xiao. Climate resources theory: Novel investigation on the role of climate in crop production and economic development[J].
Journal of China Agricultural University, 2025, 30(10): 299-306.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.23

气象资源论: 气象对作物生产与社会经济发展作用的新审视

潘志华 黄娜 陈脩

(中国农业大学 资源与环境学院/中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室, 北京 100193)

摘要 提高粮食产能、适应气候变化、发展新质生产力是当前农业气象学面临的紧迫任务, 定量揭示气象条件对粮食产能的作用机理、优化配置气象条件是完成以上任务的关键。本研究从植物生产的基本过程入手, 深入剖析气象条件与作物生产及社会经济发展之间的关系, 系统揭示气象条件对作物生产及社会经济发展的作用。结果表明: 气象条件全程参与作物生产, 是作物生产的基本资源与基本要素; 作物生产以将气象资源转化为农产品为核心功能, 是人们采取技术措施利用气象资源的过程, 技术措施能够有效调控气象资源的利用率与利用效率; 气象资源具有价值和可经营的资本性质, 对社会经济发展具有重要影响; 气象条件是生产力基本要素中劳动资料和劳动对象的重要组成部分, 是培育新质生产力的重要来源。本研究深入审视了气象资源对农业生产及经济发展的作用, 可为提高粮食产能、适应气候变化提供科学依据。

关键词 光合作用; 气象环境; 气象资源; 气象经济; 新质生产力; 农业气象

中图分类号 S162.3 **文章编号** 1007-4333(2025)10-0299-08 **文献标志码** A

Climate resources theory: Novel investigation on the role of climate in crop production and economic development

PAN Zhihua, HUANG Na, CHEN Xiao

(College of Resources and Environment, China Agricultural University/CMA-CAU Joint Laboratory of Agriculture Addressing Climate Change, Beijing 100193, China)

Abstract Improving grain production capacity, adapting to climate change, and developing new quality productive forces are the urgent tasks currently faced by agrometeorology. Quantitatively revealing the mechanism of meteorological conditions on crop production capacity and optimizing the allocation of meteorological conditions are the keys to completing the above tasks. Starting from the basic process of plant production, this study deeply analyzes the relationship between meteorological conditions and crop production as well as social and economic development, and systematically discovers the role of meteorological conditions in grain production and social and economic development. The results show that meteorological conditions are involved in crop production throughout the process and are the basic resources and elements of crop production. The core function of crop production is to convert meteorological resources into agricultural products. Technical measures can effectively regulate the utilization rate and efficiency of meteorological resources. Meteorological resources have economic value and operational capital nature, and have an important and significant impact on social and economic development. Meteorological conditions are important components of the means of labor and the objects of labor among the basic elements of productive forces, and they are important sources for

收稿日期: 2025-05-02

基金项目: 国家重点研发计划地球系统与全球变化专项(2023YFF0805703); 中国气象局气候变化专题项目(QBZ202401); 2025年乡村振兴气象服务专项(2025101010YE050)

第一作者: 潘志华(ORCID:0000-0002-8187-1574), 教授, 主要从事生态与农业气象、气候变化影响与适应、地气相互作用等研究, E-mail: panzhihua@cau.edu.cn

cultivating new-quality productive forces. This study deeply examines the role of meteorological resources in agricultural production and economic development, and can provide a scientific basis for the improvement of grain production capacity and the adaptation of agricultural production to climate change.

Keywords photosynthesis; meteorological environment; meteorological resources; meteorological economy; new quality productive force; agricultural meteorology

中国共产党第20次全国代表大会提出了建设农业强国的奋斗目标^[1]。近日,《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》^[2](以下简称《规划》)进一步明确了农业强国建设的具体内涵与目标,即:供给保障强、科技装备强、经营体系强、产业韧性强、竞争能力强。其中,供给保障强是农业强国的重要特征,也是基本特征。随着人口增加、社会经济发展,粮食需求不断增加,“供给保障强”面临重要挑战。为此,《规划》进一步提出要“扎实推进新一轮千亿斤粮食产能提升行动,深入实施粮油等主要作物大面积单产提升行动”。如何进一步大面积提升作物单产呢?这是当前保障粮食安全、实现“保障供给强”亟待解决的重大科学问题。

一直以来,各个学科都在从不同角度探究本学科能够提高粮食产量的理论与途径。如:作物育种学科通过培育新品种提高粮食单产^[3-8];作物栽培耕作学科通过优化栽培耕作策略提高粮食单产^[9];植物营养学科通过研发新型肥料或改进施肥策略提高粮食单产^[10-15];农田水利学科通过改进灌溉技术提高粮食单产^[16-21],等等。那么,农业气象学科通过什么理论和途径提高粮食单产呢?目前,人们通常将气象环境条件(简称气象条件,既包括短时间的天气条件,如风、雨、雷、电、太阳辐射、温度等,也包括长时间的气候条件,如太阳辐射、温度、降水等)看作环境因素,认为其随时、随处可用,可以再生,当环境因素适宜作物生长发育时,发挥促进作用,否则不起作用或造成灾害。然而,实际生产中发现,在不同地区、不同时段,尽管品种、施肥量、灌溉量等相同,但作物的产量与品质却不同^[22-31],这是不同地区不同作物生长时期的气象条件(数量和质量)不同的原因造成。由此可以发现:气象条件与粮食生产之间存在着比适宜性更为重要、更为复杂的关系:气象条件的数量和质量直接影响着作物的生长发育过程及产量高低。实际上,气象条件通过光合作用、农田蒸散等过程全程参与作物生产,气象条件对以上过程有着直接影响。可见,农业气象学科可以通过配置气象条件实现提高产量、改良品

质的目标。

伴随着全球日趋剧烈的气候变化,评估气候变化对粮食生产的影响是农业气象科研工作者努力回答的关键科学问题。已有气候变化对粮食生产影响的研究由于采用的方法不同,依据的原理不同,其结果大相径庭^[26,29-31]。究其原因是气候条件与作物生产之间的关系仍然不是十分清楚。迄今,在研究气候条件与粮食生产的关系时,一直把气候作为环境因素,从实际产量中分离出气候产量,然后建立气候产量与气候要素之间的统计关系,进而计算气候要素对气候产量的贡献,从而以此判断气候变化对粮食生产的影响^[26-32]。该方法的缺点是没有考虑气候条件与产量之间的作用机理,实为一种简单的统计学分析,并不能客观揭示气候变化对粮食产量的影响。因此,明确气候条件对粮食生产的作用机理,进一步揭示气候条件与粮食产量之间的相互关系,才能科学评估气候变化对作物生产的影响。

当前,新质生产力的思想正在深入社会经济各个领域^[33-35]。新质生产力是由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的先进生产力质态,以劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的跃升为基本内涵,具有强大发展动能^[35]。气象条件对粮食生产具有重要影响,深入揭示气象条件对粮食产量的作用机理,进而优化配置气象条件是发展农业气象新质生产力、促进经济社会发展的迫切需要。

基于以上背景,本研究拟从植物光合作用入手,探究气象条件与粮食(作物)生产之间的本质关系,深入认识气象条件对作物生产及社会经济发展的作用,以期农业气象学科提高对农业生产的贡献、增强农业生产适应气候变化能力及培育新质生产力、促进经济社会发展提供科学依据。

1 气象条件是植物光合作用的物质与能量来源,是植物生产的基本资源与基本要素

光合作用是植物生长发育的基本过程,是植物

利用太阳辐射、二氧化碳和水合成有机物质的过程^[36]。其中,太阳辐射、二氧化碳和水都是气象要素。可见,气象条件是植物光合作用的物质与能量来源,是植物生产的基本资源。由此可知,气象不仅是植物生产的环境条件,而且是植物生产的资源条件,全程参与植物生产,是作物生产的基本要素^[37-38]。生产实际表明,不同地区、不同时段的气候条件差异所致,气象条件主导着一个地区农业生产的基本状况。

气象条件总是以物质或能量的方式输入到作物生产系统中,作物生产所需要的基本能源和物质材料由气象环境供给。气象条件通过影响作物光合作用与呼吸作用,进而影响作物干物质的累积和转化。气象环境条件不同,可用的资源条件也就不同;气象资源的量、质不同,产品的量、质也不同。为此,气象资源与产品之间表现出了一定的数学关系,这种关系实际上为生产函数关系。黄娜等^[39-42]建立了玉米、冬小麦气候生产函数,评估了气候变化的影响程度,揭示了气候资源对作物产量的作用机理。

自然条件下,影响作物生产的环境条件主要有气象、土壤、地形。在特定地区,由于土壤、地形相对固定,影响作物产量和品质的主要因素为气象条件。由此可以推论,在自然条件下,一定地区的气象资源的数量及其组合决定了作物产量的高低及品质的差异。由于科学技术的发展,人们能够调控作物生长的环境条件,从而对作物产量、品质产生影响。人为条件下,灌溉、施肥等措施能够有效补充作物需要的营养成分,提高作物产量。值得一提的是,这样的人为技术措施实际上是有效提高了气象资源利用率与利用效率,表现为对气象资源的调节效应。

2 气象资源的利用程度与一定的社会经济条件相联系

气象条件只是气象资源的来源与基础,气象条件需同一定的社会因子相结合,才能转化为可利用的气象资源。同样的气象条件可以形成相差很大的利用效益,甚至也可能转变成为灾害。这主要决定于人们拥有的技术条件(如农田水利工程、作物

品种等)和所采取的决策与管理措施是否正确和得力。如在实际生产中发现,一个地区气候适合种植多种作物,但每种作物的收益不同;对于同一种作物,选用不同的品种、不同的技术措施(灌溉、施肥量不同)则会得到不同的收益,等等。这说明了气象条件从一种自然环境因素转变为一种可利用的资源完全离不开社会因子的作用。

近几十年来,随着社会经济的发展,生产技术条件不断优化改进,人们已经能够有效调控气象、土壤等环境因素,促进作物的生长发育,实现更高的产量目标。目前,通过品种选育、施肥、灌溉以及田间耕作等措施,同时结合优化气象资源时空匹配,使气象资源的利用效率和利用率已经明显提高^[33]。如机械化收播有效争取了更多的可利用光温资源,灌溉、施肥面积的大幅增加极大的补充了缺水、缺肥地区水分、养分的不足,深松、免耕、覆膜、密度调控等耕作种植技术通过改善农田水热状况有效增加了农业气象资源,促进了作物生产;设施农业突破气象时空限制,有效提升了气象资源的利用效率^[37-38]。由此可知,随着农业生产技术的不断改进和农业生产方式的不断优化,气象资源利用率与利用效率在不断提升,对粮食生产的贡献也在大幅增加。

3 气象资源具有经济价值,对社会经济发展具有重要影响

同样的气象资源,既可以用来生产粮食作物,也可以用来生产经济作物或其他植物,从而可以获得不同的收成与效益。由此可见,气象不只是资源,而且具有可经营的资本性质,即具有经济价值^[43]。气象资源之所以能够成为资本,就是由于其可以通过生产过程的加工产生利润,能够增值。气象资源的增值不仅与加工数量成正比,而且与由产品的特殊性所创造的商机密切相关,如特色农产品的生产与销售受到市场的影响。由此可知,气象资源的价值与社会资源的再投入密切关联。

气象资本建立在气象资源的基础上,使人类对气象环境条件的利用从物质需要提高到生产经营层面,从单纯物质的利用发展到特殊的气象经济层面。由此可知,开发利用好气象资源不但需要技术,更需要经营理念^[44]。可以说,资本观带动资源观的开拓,将能够有力指导气象资源的开发利用,促进区域经济社会发展。

4 讨 论

4.1 作物生产是利用气象资源的过程,气象既是作物生产的环境条件,也是资源条件,是生产要素

农业生产是人们采取技术措施利用气象资源的过程,其核心功能是“把气象资源转化为农产品”,气象在作物生长发育、产量形成中具有基础性作用。一方面,气象作为环境条件对作物生产的全过程产生影响,既包括作物的生长发育与产品形成过程,也包括人们对作物生产的影响与调控过程,如农机作业、施肥和施药等农事活动均需适宜的天气条件下进行。此外,气象条件对土壤、水等生产生态环境也具有重要影响,如,土壤、水等环境条件的形成与演变主要受气象条件的制约^[37]。另一方面,气象条件为作物生产提供了基本的物质和能量来源,是典型的生产资源^[37]。光、温度、水分、气体等气象要素在作物生产过程中共同构成了作物生产所依赖的自然气象资源与生产要素。气象资源与人工补充的其他资源,如肥料、灌溉水等一起,协同参与作物的产量和品质形成过程。在这个过程中,气象条件为主导资源,其他条件为辅助调节资源。

因此,作物生产是在一定的气候环境背景下利用气象资源的过程,气候环境背景直接影响着气象资源的利用,这就是气象要素与作物产量之间呈现非线性的根源,在气象环境适宜农作物生理活动时,气象环境能够转化为可利用的资源;反之,不仅无法利用,还可能导致损害,甚至成为农业气象灾害。由于不同作物对气象条件的需求不同,对某一作物物种或品种来说可能是资源,对另一物种或品种可能不可利用,甚至构成胁迫或灾害。

气象之所以能够成为资源是由于它能够提供生产过程所需要的原材料、能量。气象只有在作为生产要素时,才能转变为资源。由于作物生产是在一定的气候环境条件下利用气象资源的过程,为此,有利的气象条件是自然生产力,是资源;不利的气象条件则破坏生产力,是灾害。

4.2 气象是影响社会经济发展的首要环境与资源条件,创新开发利用理念与方式是培育新质生产力的重要源泉

气象条件直接制约着一个地区自然生产、经济社会的发展状况,是影响社会经济发展的首要环境

与资源因素。之前,人们对气象的作用认识不够。在社会经济发展高度发达的当今,要重新审视气象环境与资源的基础性作用。作为环境,气象是生命之源、生态之基。从地球演化史来看,气象先生命而存在,是生命起源的基本条件。生命形成后,与气象为基础的环境一起构成了生态系统。目前形成的自然环境,气象环境是基础,主导着生态系统的状态。作为资源,气象是生产之要,发展之本。作物生产是利用气象资源合成产品的过程,气象条件是生产的基本要素与基本资源。植物生产是第一性生产,是经济社会发展的基石,直接决定着一个地区发展的基本物质条件。

气象资源具有自然性和社会性双重性质,是一个既包含许多自然因子,又包括许多社会因子在内的庞大系统。由于要素之间的相互作用,区分各个要素的贡献还很困难。当前,对气象系统各成分及其相互作用还没有精确诊断分析和预测的客观条件,人们还未能完全弄清这一系统各个成分的相互联系。因此,在评估其贡献时只能采取一些简化的办法。比如,进行理想化处理,在计算某种资源的潜力时,假设其他条件与资源均达到理想要求,只估计某一种资源量所能达到的产量极限。

气象资源具有数量、时空位和质量三大属性^[38]。气象资源的质量是指区域内任何气象要素及其组合与生物需求之间的协调程度,是衡量区域生产力水平的重要指标。在适宜的环境下,作物生产可以获得某个地区某段时间内的第一性生产力的理论最大值;在实际环境下,区域内实际形成的第一性生产力与理论最大值存在偏差。气象资源质量的优劣取决于这个偏差(也包括其变化情况),差值越大,气象资源质量越差;反之,气象资源质量越高。在实际生产中,作物产量往往由短缺的要素决定。为此,人们常常通过调节气象要素中的短缺要素,提高作物产量。

气象资源的以上特征与属性为培育农业气象新质生产力提供了理论依据。气象条件是生产力基本要素中劳动资料和劳动对象的重要组成部分,是培育新质生产力的重要来源。创造适宜的环境条件有利于气象资源的高效与充分利用,进而有利于物质财富的积累,促进社会经济的发展。近几十年来,随着技术的不断进步,人们利用气象资源的能力不断增强,气象资源利用率与利用效率不断

提高。各地通过不断调整作物布局、引种改制、改造中低产田、改进种植耕作方式,极大地提高了气象资源的利用率,为粮食高产、丰产做出了显著成绩。如,华北地区两年三熟制改为一年两熟制,四川、广西开发秋季气候资源促进再生稻的大发展,新疆大力发展棉花生产,云南开发低热河谷热量资源建立咖啡热作基地,等等。需要注意的是,人们习惯把气象资源看作再生资源的观点并不完全正确,因为在单位时间内的很多气象资源量仍然是固定和有限的,用了一些,就少一些,用得过多,就会枯竭。每年农业生产季节里作物能够获得的热量资源与水资源都是数量有限的一次性资源。我国北方的干旱就是由于每年所能得到的雨水有限,不能满足作物需要的结果。因此,气候资源不能简单地看作永不枯竭的再生资源,用多了将会引起生态失衡,进而造成生态退化。

4.3 气候变化形势愈加剧烈,作物生产及经济社会发展需要积极适应

当前,由于人类活动的加剧,气候发生了显著变化,对自然生态、社会经济产生了重要影响。气候变化意味着环境与资源条件发生了变化,这会直接影响到作物生产及社会经济发展过程。之前作物生产过程中不考虑气候因素的资源关系,仅仅在研究气候变化时考虑气候变化的影响,不能够全面认识气候变化的影响程度。如今,要把气象资源观纳入进来,重新认识气象在作物生产、社会经济发展中的作用,重新评估气候变化的影响程度,重新考虑应对气候变化的对策措施,趋利避害,为农业生产、社会经济发展提供新的科学依据。

4.4 气象资源论对相关学科理论创新具有重要促进作用

气象资源是生产要素,全过程参与植物生产,气象资源具有可经营的资本性质,这说明气象条件与植物生产、社会经济的关系发生了重要变化,这对丰富发展植物学、作物学、农业气象学、生态学、经济学等多个学科的基本原理具有重要作用。之前,各个学科都把气象作为环境要素,没有考虑气象在植物生产过程中的参与作用。当气象作为资源要素参与植物生产过程时,相关的基本理论都要发生变化。如植物学要考虑气象要素量的多少及强度高低对植物生理过程的影响,植物生产力的计

算要包括气象要素的作用。对于农业气象学来说,其理论体系、指标体系需要做一次深刻的变革才能更好地适应现代农业生产的需要。对于生态学来说,气象是生态之基,气象条件的变化会直接影响生态系统的状态。对于经济学来说,气象资源也是稀缺资源,直接影响着一个地区的经济社会发展,一个地区的经济常常受到紧缺资源的制约,气象资源是发展之本。

5 结论与展望

提高粮食产能、适应气候变化、发展新质生产力是当前农业气象学面临的紧迫任务。本文从植物生产的基本过程入手,探究了气象条件与作物生产之间的本质关系,重新审视了气象条件对作物生产及经济社会发展的作用。主要结论如下:

1)气象不仅是作物生产的环境条件,也是作物生产的资源条件,全程参与作物生产,是作物生产的基本要素;作物生产是人们把气象资源转化为农产品的过程,气象资源与作物产量之间能够建立函数关系。

2)气象条件需要同一定的社会因子结合起来才能转化为资源,气象资源具有数量与质量等属性,技术条件能够有效调控气象资源的利用率与利用效率。

3)气象资源具有经济价值与可经营的资本性质,对经济社会发展具有重要影响。

4)气象作为环境要素是生命之源、生态之基;作为资源要素是生产之要、发展之本。

5)气象条件是生产力基本要素中劳动资料和劳动对象的重要组成部分,是培育新质生产力的重要来源。

以上观点构成了气象资源论的主要内容。气象资源论为深入认识气象对农业生产的作用、评估气候变化对农业生产的影响程度提供了解决思路,为合理配置气象资源、发展农业气象新质生产力、促进社会经济发展提供了科学依据,对促进相关学科的发展将能够起到积极的贡献。当前,随着信息技术的快速发展,智慧农业迅速兴起,气象条件与作物生长发育、产量形成的关系是发展智慧农业的关键。气象资源论对促进智慧农业的发展也将能够发挥积极的作用。

参考文献 References

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[DB/OL]. [2025-05-02]. https://www.news.cn/politics/cpc20/2022-10/25/c_1129079429.htm
- Xi J P. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: Report at the 20th National Congress of the Communist Party of China[DB/OL]. [2025-05-02]. https://www.news.cn/politics/cpc20/2022-10/25/c_1129079429.htm (in Chinese)
- [2] 中共中央、国务院. 加快建设农业强国规划(2024—2035年)[DB/OL]. [2025-05-02]. http://www.scio.gov.cn/zdgz/jj/202504/t20250408_889683.html
- The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. The Plan for Accelerating the Building of a Strong Agricultural Country (2024-2035)[DB/OL]. [2025-05-02]. http://www.scio.gov.cn/zdgz/jj/202504/t20250408_889683.html (in Chinese)
- [3] 刘伟, 李胜男, 阮双, 宋梦秋, 薛文侠, 何水华, 李洪彬, 杨勇, 胡兴明. 我国小麦育种主要进展与展望[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(2): 1-6
- Liu W, Li S N, Ruan S, Song M Q, Xue W X, He S H, Li H B, Yang Y, Hu X M. Progress and prospect of wheat breeding in China[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(2): 1-6 (in Chinese)
- [4] 杨璇, 胡骏. 杂交水稻育种技术的研究进展[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2024, 70(5): 556-566
- Yang X, Hu J. Progress in hybrid rice breeding technology[J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2024, 70(5): 556-566 (in Chinese)
- [5] 顾亮亮, 朱亮, 赵静娟, 寇远涛. 全球玉米育种技术研究进展与展望[J]. 农业展望, 2024, 20(12): 108-121
- Gu L L, Zhu L, Zhao J J, Kou Y T. Research progress and prospect of global maize breeding technology[J]. *Agricultural Outlook*, 2024, 20(12): 108-121 (in Chinese)
- [6] Zeng D L, Tian Z X, Rao Y C, Dong G J, Yang Y L, Huang L C, Leng Y J, Xu J, Sun C, Zhang G H, Hu J, Zhu L, Gao Z Y, Hu X M, Guo L B, Xiong G S, Wang Y H, Li J Y, Qian Q. Rational design of high-yield and superior-quality rice[J]. *Nature Plants*, 2017, 3(4): 17031
- [7] 李振声. 我国小麦育种的回顾与展望[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(2): 1-4
- Li Z S. Retrospect and prospect of wheat breeding in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2010, 12(2): 1-4 (in Chinese)
- [8] 李洪杰, 陈明, 李少雅, 李少雅, 张立超, 谢永盾, 郝元峰, 马有志. 小麦生物育种: 进展、机遇和挑战[J]. 中国基础科学, 2022, 24(4): 1-8, 28
- Li H J, Chen M, Li S Y, Zhang L C, Xie Y D, Hao Y G, Ma Y Z. Wheat biotech-breeding: Progresses, opportunities and challenges[J]. *China Basic Science*, 2022, 24(4): 1-8, 28 (in Chinese)
- [9] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959
- Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959 (in Chinese)
- [10] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 李慧, 孙楠. 长期施肥下作物产量演变特征的研究进展[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2387-2392
- Li Z F, Xu M G, Zhang H M, Li H, Sun N. Summarize of crop yield dynamic under long-term fertilization[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(6): 2387-2392 (in Chinese)
- [11] Zhang H M, Xu M G, Zhang F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2009, 147(1): 31-42
- [12] 李红陵, 王定勇, 石孝均. 不均衡施肥对紫色土稻麦产量的影响[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 487-490
- Li H L, Wang D Y, Shi X J. Effects of nutrient non-equilibration N purple soil on crop productivity[J]. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 2005, 27(4): 487-490 (in Chinese)
- [13] 宇万太, 张璐, 马强, 殷秀岩, 沈善敏. 施肥进步在粮食增产中的贡献及其地理分异[J]. 应用生态学报, 2003(11): 1855-1858
- Yu W T, Zhang L, Ma Q, Yin X Y, Shen S M. Contribution of fertilization development to yield production and its geographic differentiation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1855-1858 (in Chinese)
- [14] 朱洪勋, 张翔. 长期施肥对小麦玉米的增产效应及其对土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 1997, 28(4): 160-163
- Zhu H S, Zhang X. The yield-increasing effect of long-term fertilization on wheat and corn and its influence on soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, 28(4): 160-163 (in Chinese)
- [15] 江天, 郭佳旭, 周冉冉, 张鑫, 徐霄, 张卫峰, 田静. 优化减氮对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 72-81
- Jiang T, Guo J X, Zhou R R, Zhang X, Xu X, Zhang W F, Tian J. The impact of optimized nitrogen reduction on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 72-81 (in Chinese)
- [16] 唐树鹏, 刘洋, 简超群, 徐云姬, 张伟杨, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻产量、水氮利用效率和稻米品质影响的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(4): 184-192
- Tang S P, Liu Y, Jian C Q, Xu Y J, Zhang W Y, Wang Z Q, Yang J C. Progress on effects of alternating wet and dry irrigation on use efficiency of water and nitrogen, yield and quality of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(4): 184-192 (in Chinese)
- [17] 王家瑞, 刘卫星, 陈雨露, 康娟, 张艳菲, 徐文俊, 侯阁阁, 李华, 王晨阳. 不同灌水模式对冬小麦产量及水分利用的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1229-1236
- Wang J R, Liu W X, Chen Y L, Kang J, Zhang Y F, Xu W J, Hou G G, Li H, Wang C Y. Regulatory effect of different irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(10): 1229-1236 (in Chinese)
- [18] 杨明达, 关小康, 刘影, 崔静宇, 丁超明, 王静丽, 韩静丽, 王怀萃, 康海平, 王同朝. 滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(3): 443-459
- Yang M D, Guan X K, Liu Y, Cui J Y, Ding C M, Wang J L, Han J L, Wang H P, Kang H P, Wang T C. Effects of drip irrigation pattern and water regulation on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen, and water use efficiency in summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3): 443-459 (in Chinese)
- [19] 刘毅, 孙宏勇, 徐宏斌, 曾令海, 代敬, 董心亮, 王金涛. 华北平原种植制度节水高效多目标综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2025, <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2025071>
- Liu Y, Sun H Y, Xu H B, Zeng L H, Dai J, Dong X L, Wang J T. Multi-Objective comprehensive evaluation of cropping systems for water-saving and high efficiency in the North China Plain: A case study of Cangzhou, Hebei Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2025071> (in Chinese)
- [20] 刘丽平, 张克寒, 佟玲, 王素芬, 戴永辉. Meta分析滴灌灌溉量及品种对玉米

- 产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(1): 1-13
- Liu L P, Zhang K H, Tong L, Wang S F, Dai Y H. Effects of different irrigation amounts and maize varieties on the yield of maize and water use efficiency: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(1): 1-13 (in Chinese)
- [21] 白梓辰, 李保成, 杜二小, 张乐, 侯建伟, 赵沛义, 任永峰, 王伟妮, 刘勇, 张德全. 内蒙古黄土高原区限量补灌对玉米根系及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(7): 66-80
- Bai Z C, Li B C, Du E X, Zhang L, Hou J W, Zhao P Y, Ren Y F, Wang W N, Liu Y, Zhang D Q. Effects of limited supplementary irrigation on maize roots and yield in the Loess Plateau region of Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(7): 66-80 (in Chinese)
- [22] 孟晓琛, 张富仓, 刘蓝骄, 陆军胜, 何平如, 肖超. 播期和水氮互作对滴灌施肥春玉米生长和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1794-1804
- Meng X C, Zhang F C, Liu L J, Lu J S, He P R, Xiao C. Effects of sowing date and water-nitrogen interaction on the growth and water and nitrogen utilization of spring maize under drip fertigation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1794-1804 (in Chinese)
- [23] 孙宏勇, 刘小京, 王金涛, 董心亮, 郭凯, 巨兆强. 品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 837-846
- Sun H Y, Liu X J, Wang J T, Dong X L, Guo K, Ju Z Q. Effects of sowing date and cultivar on grain yield and water use efficiency of spring maize in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 837-846 (in Chinese)
- [24] 龚牙会, 杨敏, 林萍, 高超, 杨立达, 朱文雪, 彭新月, 袁晓婷, 李雨泽, 杨文钰, 雍太文. 播期对不同海拔地区带状间作大豆茎叶生长和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 187-198
- Gong Y H, Yang M, Lin P, Gao C, Yang L D, Zhu W X, Peng X Y, Yuan X T, Li Y Z, Yang W Y, Yong T W. Effects of sowing date on the stem and leaf growth and yield of soybean strip intercropping at different altitudes[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 187-198 (in Chinese)
- [25] 钱春荣, 王荣焕, 赵久然, 于洋, 郝玉波, 徐田军, 姜宇博, 官秀杰, 李梁, 葛选良. 不同熟期玉米品种的籽粒灌浆特性及其与温度关系研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 105-114
- Qian C R, Wang R H, Zhao J R, Yu Y, Hao Y B, Xu T J, Jiang Y B, Gong X J, Li L, Ge X L. Study on the grain filling characteristics and their relationship with temperature of maize hybrids differing in maturities[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(8): 105-114 (in Chinese)
- [26] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11
- Guo J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 1-11 (in Chinese)
- [27] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨. 自然灾害学报[J], 2011, 20(6): 13-18
- Fang S B. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. *Journal of Natural Disasters*. 2011, 20(6): 13-18 (in Chinese)
- [28] 刘桂珍, 郭书磊, 魏良明, 张新, 刘海静, 王振华, 鲁晓民. 河南夏玉米主产区气象因素对产量的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(6): 55-66, 76
- Liu G Z, Guo S L, Wei L M, Zhang X, Liu H J, Wang Z H, Lu X M. Influence of meteorological factors on yield of summer maize in Henan Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(6): 55-66, 76 (in Chinese)
- [29] 王妍, 张晓龙, 石嘉丽, 沈彦军. 中国冬小麦主产区气候变化及其对小麦产量影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 723-734
- Wang Y, Zhang X L, Shi J L, Shen Y J. Climate change and its effect on winter wheat yield in the main winter wheat production areas of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 723-734 (in Chinese)
- [30] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 陈长青. 近 20 年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3132-3145
- Lu W T, Yu H, Cao S N, Chen C Q. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in last 20 years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3132-3145 (in Chinese)
- [31] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 王彦梅, 邵立威, 高丽娜. 气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 215-218
- Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, Wang Y M, Shao L W, Gao L N. Effect of meteorological factors on grain yield of summer maize in the north China plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 215-218 (in Chinese)
- [32] Tsimba R, Edmeades G O, Millner P J, Kemp P D. . The effect of planting date on maize grain yields and yield components[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 135-144
- [33] 牢牢把握东北的重要使命 奋力谱写东北全面振兴新篇章[N]. 人民日报, 2023-09-10(01)
- Firmly Grasp the Important Mission of Northeast China and Strive to Write a New Chapter in Its Comprehensive Revitalization[N]. *People's Daily*, 2023-09-10 (01) (in Chinese)
- [34] 加快发展新质生产力 扎实推进高质量发展[N]. 人民日报, 2024-02-02(01)
- Accelerate the Development of New Quality Productive Forces and Steadily Advance High-Quality Development[N]. *People's Daily*, 2024-02-02(01) (in Chinese)
- [35] 贾若祥. 新质生产力的科学内涵和发展重点[N]. 中国经济时报, 2024-01-16(04)
- Jia R X. The scientific connotation and development focus of new quality productive forces[N]. *China Economic Times*, 2024-01-16(04) (in Chinese)
- [36] 孙扬, 陈立超, 石艳云, 王珂, 吕丹丹, 徐秀美, 张立新. 作物光合作用合成生物学的策略与展望[J/OL]. 合成生物学. <https://link.cnki.net/urlid/10.1687.Q.20250321.1312.002>
- Sun Y, Chen L C, Shi Y Y, Wang K, Lv D D, Xu X M, Zhang L X. Strategies and prospects of synthetic biology in crop photosynthesis[J/OL]. *Synthetic Biology Journal*. <https://link.cnki.net/urlid/10.1687.Q.20250321.1312.002> (in Chinese)
- [37] 潘志华. 新阶段农业气象学发展面临的形势与研究展望[J]. 中国农业气象, 2023, 44(4): 327-332
- Pan Z H. Current situation and research prospect of agrometeorology in the new stage[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(4): 327-332 (in Chinese)
- [38] 潘志华, 侯英雨. 系统观、资源观与当前农业气象有关问题的解决思路[J]. 中国农业气象, 2025, 46(2): 270-274
- Pan Z H, Hou Y Y. System theory, resource theory and solution ideas of the current problems related to agrometeorology [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2025, 46(2): 270-274 (in Chinese)
- [39] 黄娜. 基于生产函数的中国玉米生产适应气候变化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2023
- Huang N. The adaptation of maize production to climate change in China based on the production function[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [40] Huang N, Liang J, Lun F, Jiang K, Long B J, Chen X, Gao R P, Zhou Y, Men J Y, Bi P S, Pan Z H. Quantifying the sensitivity of maize production to long-term trends in fertilization and regional climate in China[J]. *Journal*

- of Agriculture and Food Research*, 2024, 15:101015
- [41] Huang N, Lin X M, Lun F, Zeng R Y, Sassenrath G F, Pan Z H. Nitrogen fertilizer use and climate interactions: Implications for maize yields in Kansas [J]. *Agricultural Systems*, 2024, 220:104079
- [42] Huang N, Song Y, Wang J L, Zhang Z Y, Ma S Q, Jiang K, Pan Z H. Climatic threshold of crop production and climate change adaptation: A case of winter wheat production in China[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10:1019436
- [43] 牛文元. 自然资源开发原理[M]. 开封:河南大学出版社, 1989
Niu W Y. *Principles of Natural Resource Exploitation*[M]. Kaifeng: Henan University Press, 1989 (in Chinese)
- [44] 张家诚. 气候资源与气候资本[N]. 中国气象报, 2004-04-13(03)
Zhang J C. Climate resources and climate capital[N]. *China Meteorological News*, 2004-04-13(03) (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 潘志华, 博士, 中国农业大学资源与环境学院二级教授, 博士生导师, 中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室主任。全国气象科教融合创新联盟委员会委员, 全国农业气象服务专家组成员, 中国气象学会常务理事, 中国农学会理事, 国家农业气象标准化技术委员会委员, 中国农业绿色发展研究会防灾减灾专业委员会副主任, 中国自然资源学会资源利用与减灾专业委员会委员, 北京市气象标准化技术委员会委员, 中国农业大学知名教授科普宣讲团专家, 中国农业大学本科生学业咨询师。主要研究领域为气候变化影响与适应、地气相互作用与气候变化、农业与生态气象。主持和主要参加国家重点研发计划、国家科技支撑计划、国家重点基础研究 973 计划、国家自然科学基金等科研项目 20 余项, 发表论文 160 余篇, 获省部级奖励 4 项。