



美国大豆高产记录剖析及中国大豆单产提升途径探索

夏灵石^{1,2,3}, 武婷婷^{2,3}, 袁珊^{2,3}, 曹东², 秦超³, 蒋炳军³, 孙石³, 武小霞¹, 韩天富^{1,2,3}, 王培国^{2,3*}

(1. 东北农业大学农学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 2. 三亚中国农业科学院国家南繁研究院, 海南三亚 572024; 3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 美国大豆种植历史虽然不长, 但其生产水平始终位居世界前列。通过充分挖掘良种、良技、良机与良态的综合优势, 美国构建了一套系统化、高效率的现代大豆生产体系。该体系集成了品种遗传潜力开发、土壤生态改良、精准田间管理、病虫害综合防治以及气象灾害应对等关键技术环节, 实现了大豆生产的全方位优化。本文通过剖析 Kip Cullers、Randy Dowdy 与 Alex Harrell 等高产纪录创造者的种植实践, 归纳并总结出三大核心技术路径与关键成功要素: (1) 品种筛选与精准种植配套: 选育早熟、耐密、抗逆的大豆品种, 依据积温带科学划分种植区域与适播期, 优化播种密度, 构建高光效群体结构; (2) 土壤生态系统优化: 集成网格采样、石灰调酸、覆盖作物、轮作倒茬与精准施肥等组合技术, 提升土壤养分利用效率与生态系统稳定性; (3) 智能化精准管控与绿色防控: 依托物联网传感器实时监测墒情与病虫害动态, 精准施用生物农药, 构建涵盖预测、监测与精准干预的综合防控体系。在此基础上, 结合我国主产区的气候特征、土壤条件及面临的现实挑战, 提出中国特色的大豆单产提升路径。通过统筹品种选育、土壤和养分管理、病虫害防控与栽培制度优化等关键环节, 构建协同高效的大豆生产技术体系, 以破解当前我国大豆单产低和资源利用效率不足等问题。研究结果可为我国高产高效大豆生产技术体系的构建及产业提质增效提供支撑与实践参考。

关键词: 美国大豆; 高产纪录剖析; 中国大豆; 单产提升途径

Analysis of High-Yield Records of Soybean in the United States and Exploration of Ways for Enhancing Soybean Per Unit Yield in China

XIA Lingshi^{1,2,3}, WU Tingting^{2,3}, YUAN Shan^{2,3}, CAO Dong², QIN Chao³, JIANG Bingjun³, SUN Shi³, WU Xiaoxia¹, HAN Tianfu^{1,2,3}, WANG Peiguo^{2,3*}

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 2. National Nanfan Research Institute (Sanya), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Sanya 572024, Hainan, China; 3. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Although the history of soybean cultivation in the United States is relatively short, its production level has consistently ranked among the world's highest. By fully leveraging the integrated advantages of superior varieties, advanced technologies, intelligent machinery, and favorable ecological conditions, the U. S. has established a systematic and highly efficient modern soybean production system. This system incorporates key technological components including genetic potential development, soil ecology improvement, precision field management, integrated pest and weed control, as well as meteorological disaster response, achieving comprehensive optimization in soybean production. By analyzing the cultivation practices of record-breaking high-yield farmers such as Kip Cullers, Randy Dowdy, and Alex Harrell, this study identifies and summarizes three core technical pathways and key success factors. (1) Variety selection and precision-adapted cultivation: Selection and deployment of early-maturing, high-density-tolerant, and stress-resistant soybean varieties; zoning of planting regions and sowing periods based on thermal time zones; and optimization of row spacing and plant density to establish a canopy structure with high light-use efficiency. (2) Soil ecosystem optimization: Integration of grid-based soil sampling, lime amendment for pH regulation, cover cropping, crop rotation, and precision fertilization to improve nutrient use efficiency and enhance soil ecological stability. (3) Smart precision management and green control: Application of Internet of Things (IoT) sensors to monitor soil moisture and pest-weed-disease dynamics in real time; precise use of biopesticides; and development of a comprehensive prevention and control system encompassing forecasting, monitoring, and targeted intervention. Building on these insights, and in light of the climatic conditions, soil characteristics, and practical challenges faced by major soybean-producing regions in China, this study proposes a yield enhancement pathway tailored to China's national context. By coordinating key components including variety development, soil and nutrient management, green pest and weed control, and cultivation system optimization, aiming to construct an integrated and efficient soybean production technology system. This framework is expected to address the current constraints of low yield and suboptimal resource use efficiency in China, and to

收稿日期: 2025-05-28

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1201300); 三亚中国农业科学院国家南繁研究院“南繁专项”(YBXM2528)。

第一作者: 夏灵石, 男, 硕士研究生, 主要从事大豆育种技术创新研究。E-mail: xialingshi1202@163.com。

通讯作者: 王培国, 男, 博士, 主要从事大豆育种技术创新研究。E-mail: wpg15101224039@163.com。

provide theoretical support and practical guidance for the advancement of high-yield and high-efficiency soybean production and overall industry improvement.

Keywords: American soybean; analysis of high-yield records; Chinese soybeans; ways for enhancing soybean per unit yield

在气候变化、耕地资源约束与全球供应链波动等多重挑战交织的背景下,粮食安全问题日益凸显^[1]。作为兼具粮油饲蔬属性的战略作物,大豆的生产格局与技术路径对全球食物供应体系具有关键影响力^[2]。据美国农业部(USDA)的统计数据^[3],2024—2025年度全球大豆总产量达4.2亿t,其中巴西(巴西大豆产季跨年,收获期延续至2025年)以1.69亿t(占比39.6%)位居首位,美国以1.18亿t(占比28.3%)紧随其后,两国合计贡献全球近70%的大豆产能。中国是全球最大的大豆消费国(年消费量超过1.1亿t),但2024年本土产量仅为2065万t,进口依存度已攀升至85%左右,成为威胁国家粮食安全与油料安全及制约经济发展的重大瓶颈。

美国大豆种植历史虽然较短,但生产水平世界领先,主要集中在中西部地区,特别是伊利诺伊州、爱荷华州、明尼苏达州等州(表1)。通过持续优化种植技术、提升单产与扩大种植面积,美国大豆产量显著增长,为我国大豆产业发展提供了有益借鉴。基于此,本文系统梳理了美国高产大豆的主产区、品种特性、产量表现及相关技术与管理策略,深入剖析其背后的科技支撑与生产模式,并结合中国大豆生产实际,提炼可借鉴的经验路径,旨在为我国大豆生产能力提升与产业体系优化提供理论参考与实践指导。

表1 美国主要地区2013—2024年大豆单产和面积

Table 1 Soybean yield and harvested area in major U.S. states from 2013 to 2024

地区(州) Region (State)	单产 Yield/ (kg·hm ⁻²)		收获面积 Harvested area/(×10 ⁶ hm ²)	
	2013年	2024年	2013年	2024年
Illinois	3368.0	4378.4	3.85	4.37
Iowa	3065.9	4109.0	3.77	4.05
Minnesota	2829.1	3098.6	2.67	2.96
North Dakota	2054.5	2559.7	1.86	2.67
Missouri	2425.0	3165.9	2.27	2.35
Indiana	3470.2	4176.3	2.11	2.35
Nebraska	3603.8	3974.2	1.94	2.15
South Dakota	2728.1	3031.2	1.86	2.19

注:数据来源:USDA(<https://www.fas.usda.gov/>),NASS(www.nass.usda.gov)。

Note: Data Source: USDA (<https://www.fas.usda.gov/>), NASS (www.nass.usda.gov).

1 美国大豆高产纪录典型:技术革新及实践探索

在全球大豆产业格局中,美国凭借其先进的农业技术和创新实践,不断刷新大豆产量世界纪录,引领着行业发展方向。来自密苏里州的Kip Cullers(简称Cullers)、佐治亚州的Randy Dowdy(简称Dowdy)和Alex Harrell(简称Harrell)等种植者的成功案例,展现了农业科技与精细化管理相结合的巨大潜力,为全球大豆种植、生产提供了宝贵经验(表2)。

表2 美国创造的世界大豆高产纪录典型案例解析

Table 2 Detailed profiles of the world soybean yield records in the USA

地区 Area	种植者 Grower	年份 Year	品种 Variety	生育期组 Maturity group (MG)	选育单位 Breeding unit	产量 Yield/ (bushel·acre ⁻¹)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	播种日期 (月-日) Planting date	收获日期 (月-日) Harvest date
Missouri, USA	Cullers	2006	94M80	MG 4.8	Pioneer	139.4	9381.0	-	10-7
		2010	94Y71	MG 4.7	Pioneer	160.6	10818.0	4-14	9-28
Georgia, USA	Dowdy	2016	74A74RS	MG 4.7	UniSouth Genetics	171.8	11572.5	4-22	8-28
		2019	49X7S	MG 4.9	Hefty Seed	190.2	12811.9	4-10	8-28
		2023	AG48X9	MG 4.8	Asgrow	206.8	13930.1	4-5	8-23
		2024	P49Z02E	MG 4.9	Pioneer	218.3	14705.0	3-21	8-13

注:1 acre = 0.405 hm², 1 bushel = 27.24 kg, 1 bushel·acre⁻¹ = 67.36 kg·hm⁻²。

1.1 Kip Cullers:高产品种与精细管理并重

2006年,Cullers在密苏里州以平均139.4 bushels·acre⁻¹(约9381 kg·hm⁻²)的产量创造了大豆单产世界纪录,荣获密苏里州大豆协会产量竞赛

传统类别冠军(<https://www.farmtalknews.com/news/bin-busting-soybean-yield-breaks-world-record>)^[4]。2010年,他将记录进一步提升至160.6 bushels·acre⁻¹(约10810 kg·hm⁻²)(<https://www.farmprogress.com>).

com/soybean)^[5]。Cullers 的大豆种植模式与美国多数农民明显不同。他运用传统耕法精细整地,大量投入农药、化肥并频繁灌溉,借助多种生长调节剂促进根系发育、调控主茎高度、增强光合作用和优化源库关系,加速光合产物向豆荚转运,进而减少落花落荚现象^[5]。

Cullers 选用了具有优良遗传潜力的 94M80 和 94Y71 大豆品种,为高产奠定基础。他将种植地块选在密苏里州斯塔克城附近牛顿县的沙质壤土区域,配套灌溉系统并采用常规耕作方式,从生态与耕作条件两方面优化种植环境^[4]。在病虫害防治方面,他严格按照说明使用了巴斯夫(BASF)公司的 Headline[®] 杀菌剂和先正达(Syngenta)公司的 Warrior[®] 杀虫剂,确保用药科学、效果稳定,有效降低病虫害对产量的影响。

在栽培管理方面,Cullers 尤为重视种子处理环节,不仅在播种前接种根瘤菌,还通过种衣剂等方式促进根系早发快长,使整个生育期内根系始终保持健康活跃状态,从而充分吸收 10 cm 以内表土层的养分和水分^[5]。他提出“高产始于播种”的核心理念,并强调出苗时间的关键性:“我希望所有种子在短时间内完成出苗,任何超过 72 h 才出苗的植株,其生长发育将严重滞后,最终在田间表现如同杂草,难以形成有效豆荚”。基于对均匀、快速出苗重要性的深刻认识,他在播种环节实施了严格管控。

此外,Cullers 高度重视品种选择与种植密度的优化,以打造理想的群体结构。在植株形态调控方面,为有效防控倒伏问题,他在苗后使用触杀型除草剂乳氟禾草灵(Cobra)进行处理,通过精准控制用药剂量,使其作用于大豆主茎生长点,抑制主茎的纵向生长并诱导分枝形成,从而降低植株高度、增强抗倒伏性,优化冠层结构。在整个生育期中,他持续进行田间监测,动态评估植株群体结构与土壤养分供给的匹配情况,确保大豆始终处于高效、稳健的生长状态。

1.2 Randy Dowdy: 创新轮作与环境管理策略

2016 年,Dowdy 以 171.8 bushels·acre⁻¹ (约 11 572 kg·hm⁻²) 的产量打破 Cullers 保持 6 年的世界纪录,开创高产新时代(<https://heftyseed.com/dowdy-record-yields>)。起初,大豆在佐治亚州并非主要作物,Dowdy 将其作为玉米后的轮作作物,随后通过系统化的创新种植模式,挖掘大豆高产潜力。

Dowdy 深刻认识到控制大豆植株生长压力是提升产量的关键。他结合生育期管理,施用家禽厩肥和氮肥,改善土壤肥力,并种植覆盖作物以提升土壤结构。在品种选择上,他选用 UniSouth Genetics

(USG) 公司推出的 74A74RS 大豆品种,并配套 15 inch(约 38 cm) 行距的播种机以严格控制播种量,构建稳定的植株架构。

针对当地高温环境,他采取多项应对措施:在施用除草剂后辅以 Priaxor[®] 杀菌剂帮助大豆植株恢复;繁殖期二次施药预防病害;夜间灌溉降低大豆热应激,避免正午高温冲击植株。他还根据当地气候特征合理安排播期,降低高温对大豆生长的不利影响。在病虫害防治方面,选用 BASF 公司的 Fastac[®] EC 杀虫剂和 Priaxor[®] 杀菌剂,精准防控病虫害。

2019 年,Dowdy 再次刷新记录,采用具有抗草甘膦特性的大豆品种 49X7S,产量提升至 190.2 bushels·acre⁻¹ (约为 12 812 kg·hm⁻²) (<https://heftyseed.com/dowdy-record-yields>)。该品种结荚密、种子大、抗逆性强,适合密植。他与 Hefty Seed 公司合作,借助 Hefty Complete 种子处理技术提升种子活力,并基于东南部土壤的种植数据,制定精细化管理方案。这一合作模式不仅提升了自身产量,也推动了区域大豆种植水平的提升。

1.3 Alex Harrell: 数字化管理与持续优化实践

2023 年 8 月 23 日,Harrell 以 206.8 bushels·acre⁻¹ (约合 13 930 kg·hm⁻²) 的产量刷新 Dowdy 在 2019 年创下的大豆高产世界纪录(<https://soygrowers.com/georgia-grower-alex-harrell-topples-soybean-yield-world-record>)。Harrell 选取 60 acre 沙质壤土中的 10 acre 核心地块进行管理,该地块配备枢轴式灌溉系统,具备良好的水分调控条件。种植前,他实施了一系列土壤改良措施,包括秋季网格土壤采样、石灰调酸,冬季种植覆盖作物,春季条耕配合施用石膏和鸡砂等,为大豆根系发育营造理想环境。Harrell 选用大豆品种 AG48X9,于 4 月 5 日播种,并在播种时加入多种种子处理剂和一次性基础肥料。尽管种植初期遭遇强降雨,成苗数仅为 77 000 株·acre⁻¹ [约 12 684 株·(667 m)⁻²],他仍坚持精细化管理;通过每 7 d 进行 1 次组织样本分析,精准补肥;实施“零容忍”昆虫防治策略;合理安排除草剂与杀菌剂的使用,保障大豆植株健康生长。

2024 年 8 月 13 日,Harrell 以 218.3 bushels·acre⁻¹ (约 14 704 kg·hm⁻²) 的产量刷新自己的纪录(<https://www.agweb.com/news/crops/soybeans/alex-harrell-shatters-soybean-world-record-218-bushel-yield>)。此次他使用 Pioneer 公司推出的 Z 系列大豆品种 P49Z02E[™],该品种出苗整齐、生长健壮、抗逆性强,且 Enlist E3 抗性性状可有效控制杂草。在维持上一年度精细化管理策略的基础上,Harrell 进一步优化

种植和管理流程,强化小气候和土壤墒情的动态监测,并根据环境变化快速调整农艺措施,充分发挥品种潜力,提升产量与投入产出比。

2 美国大豆高产纪录剖析:从世界纪录创造者的经验中学习

美国农场主 Cullers、Dowdy 和 Harrell 在大豆种植领域屡次创造高产纪录,他们的成功经验涉及品种选择、土壤耕作、田间管理、病虫草害防控以及应对气候挑战等多个关键环节。这些技术体系的集成应用,为全球大豆高产提供了系统性参考。

2.1 依生态条件选择良种:大豆高产的遗传基石

品种选择应结合区域土壤类型与气候特征,优先考虑其遗传潜力与抗逆性。Cullers 选用的 94M80 和 94Y71 两个品种,在密苏里州特定生态条件下表现出优异的产量潜力,奠定了高产基础。Dowdy 选用的 49X7S 品种,不仅具备抗草甘膦性状,有助于提升田间杂草管理效率,还表现出良好的结荚能力与种子发育特征,有力支撑了高产目标的实现。Harrell 则选择了大豆品种 P49Z02E™,其在高温胁迫下仍能维持优良的生长态势,展现出突出的环境适应性和抗逆能力。上述案例表明,优良品种是构建高产体系的核心环节,需充分评估其在目标生态区的综合表现。

2.2 构建健康土壤生态:大豆高产的根基保障

科学的土壤管理是高产的基础保障。Cullers 采用玉米和大豆轮作方式,在排水良好的土壤上进行种植^[4-5]。该方式能维持土壤肥力,降低病、虫害风险;使土壤养分得到更合理利用,减少病虫害滋生传播。这是他实现大豆高产的重要举措,与品种选择、施肥管理、播种时间等措施共同构成高产种植体系。Harrell 在种植前期开展秋季网格化土壤采样,系统评估土壤养分状况与 pH 值,依据分析结果施用石灰中和土壤酸性,优化根系环境。他通过种植冬季覆盖作物提升土壤有机质含量,增强保水保肥能力,并减少侵蚀风险。春季条耕的实施有助于保护土壤结构,配合石膏、粪肥等改良材料的施用,为作物提供稳定的钙、硫等微量元素供应,进而优化土壤质地与通透性。这一系列措施共同构建了大豆高产所需的健康土壤生态系统。

2.3 早播优化光热利用:提升大豆产量的关键策略

早播技术已被美国高产大豆种植者广泛验证为提升产量的关键策略。Cullers、Dowdy 和 Harrell 均在实践中采用该技术,以实现对照光资源的最大化利用。早播能使大豆开花期临近夏至^[6]。此时日照最长,大豆冠层充分展开并封闭效果最佳,有

助于最大限度拦截太阳辐射,提高光合效率并促进糖类积累^[7]。同时,早播可延长种子灌浆时间,种子充实度、含油量及产量显著提高^[8]。

Harrell 的实践进一步印证了早播的优势。他通过早播使大豆在日照充足、温度适宜的阶段进入灌浆期,从而提升了种子大小和产量。在佐治亚州高温多变的气候条件下,早播还能有效规避极端天气带来的不利影响,使植株在高温到来前完成关键发育阶段,从而减少热害风险,提升整体产量。可见,早播技术通过优化光热资源配置,强化光合作用与籽粒灌浆效率,是实现大豆高产不可或缺的农艺手段。

2.4 精准管控田间要素:大豆高产的系统支撑

在大豆种植追求高产的进程中,田间管理各环节紧密关联,其中播种管理、种植密度调控、营养动态调控尤为关键,共同构成了大豆高产的系统支撑。其中,播种管理与种植密度管理对大豆高产意义重大。Dowdy 用 15 inch(约 38 cm)行距播种机,将播种密度控制在 13 万~15.6 万粒·acre⁻¹[约 2.14 万~2.57 万粒·(667 m)⁻²],构建合理株型,增强通风、透光与抗倒伏能力,并根据品种、土壤灵活调整密度。Cullers 把播种量从 14 万粒·acre⁻¹调至 12.5 万粒·acre⁻¹[约 2.06 万粒·(667 m)⁻²],在种植 Pioneer 94M80 等品种时综合多因素确定密度,还注重出苗同步,保障结实率。Harrell 在 2023—2024 年将播种率从 8.5 万粒·acre⁻¹提至 11 万粒·acre⁻¹[约 1.81 万粒·(667 m)⁻²]抗倒伏,同时采取配套措施应对密度增加的问题。他们最终的产量充分表明,精准的播种与种植密度管理,结合配套种植策略,是实现大豆高产的关键路径。

营养动态调控是大豆健康生长的关键环节。大豆在不同生长阶段对养分的需求存在显著差异,Harrell 配合大豆生育期进行精准施肥,在苗期,注重氮、磷、钾等大量元素的供应,以促进根系和茎叶的生长;在开花结荚期,除保证大量元素的充足供应外,还根据组织样本分析结果,针对性地补充硼、钼等微量元素,以提高开花质量和结荚率,为大豆生长提供持续且充足的养分支持。

2.5 精准药剂筛选防控:大豆稳产高产的关键防线

构建科学的病虫害防治体系可以为大豆稳产高产提供安全保障。Cullers 使用 Headline[®] 杀菌剂和 Warrior[®] 杀虫剂的组合,针对大豆灰斑病、疫霉根腐病及大豆蚜、食心虫等主要病虫害,将病、虫害损失率降低,同时通过每日田间巡查确保防控效果和植株安全。Dowdy 使用 Fastac[®] EC 杀虫剂和 Priaxor[®] 杀菌剂,主要用于防治大豆苗期蓟马、叶蝉

等刺吸式和咀嚼式害虫。通过“杀虫剂+杀菌剂”协同作用,覆盖苗期病虫害复合侵染,强化防治范围。Harrell 则结合田间实际使用 Revytek[®] 杀菌剂,实现多病原复合防控。在防治过程中,3位种植者均坚持“预测-监测-干预”模式:强化前期监测预警,依据虫口密度与病害等级适时精准施药,避免滥用与抗药性风险;同时严格遵守产品标签说明,确保人畜安全与环境友好。病虫害防治策略的精准、高效、绿色转型是大豆高产可持续发展的重要前提。

2.6 应对高温胁迫策略:突破复杂气候下大豆高产的瓶颈

美国佐治亚州等高温多雨区域的大豆种植面临花期热害、灌浆期倒伏等问题。当地高产种植者构建了一套以“品种抗逆性强化-农艺措施精准调控-田间微环境优化”为核心的系统性适应技术体系。在品种抗逆性强化方面,筛选并应用如 USG74A74RS、49X7S 等中早熟、耐高温的品种,搭配早熟品种使鼓粒期避开高温峰值,同时采用包含多种成分的复合种子处理剂增强种子抗逆性。农艺措施精准调控上,提前至4月21—23日播种,采用15 inch (约38 cm)行距、13万~15.6万粒·acre⁻¹ [约2.14万~2.57万粒·(667 m)⁻²]的播种密度。此外,通过提前播种缩短生育期,避开倒伏风险,结合窄行距种植增强植株抗倒伏能力。田间微环境优化层面,运用中心枢轴灌溉系统夜间喷洒井水降温并精准灌溉,种植覆盖作物改善土壤结构和保水能力,深耕与条耕优化土壤通气性和水分渗透,早播密植促进冠层闭合以调控田间小气候。该技术体系从品种、农艺措施和田间微环境多方面协同发力,有效应对气候胁迫,全方位提升大豆种植系统对气候变化的适应性和抗风险能力,为复杂气候条件下实现大豆高产稳产奠定了坚实基础。

3 美国高产大豆种植经验对中国大豆产业的启示

在当前全球粮食安全形势日益严峻的背景下,大豆作为重要的粮油兼用作物,其产量和产业发展对我国粮食安全具有重要战略意义。美国在大豆种植领域取得显著成果,其单产水平和总产量长期位居世界前列,核心在于以规模化种植、转基因技术、全产业链整合和政策强力支持形成全球领先优势。与之相比,我国大豆产业在品种产量潜力、产区气候条件、耕作制度、土壤肥力和技术到位率等方面均存在明显差距。受限于小农户分散种植、非转基因品种类型同质化、产业链各环节割裂、政策精准度不足、科技应用滞后等问题,单产仅为美国

的60%~70%,进口依存度高达85%,核心根源在于小规模生产与大市场需求、技术创新滞后与产业系统性的矛盾。

在此背景下,深入剖析 Cullers、Dowdy 和 Harrell 等美国高产种植者在品种选育、土壤管理、田间精细化管理等环节的成功经验,可有助于为中国大豆产业破解单产瓶颈、优化资源配置、提升产业链协同性提供可行路径与理论支持。

3.1 优化品种选育与栽培模式协同策略

品种选择是影响大豆产量的首要因素。美国通过推进区域化品种布局,使大豆群体密度与当地气候、土壤条件精准匹配,从而实现单位面积株数与单株生产力的平衡。借鉴其经验,我国应以群体产量构成要素(种植密度、单株粒数、百粒重)为导向,构建“个体性状-群体结构-环境适应”协同优化的育种策略。

从大豆产量形成机制来看,单位面积种子数和种子质量共同决定产量水平,而节间长度、结荚习性、分枝数和单株荚数等形态特征通过影响群体结构,间接影响这两个核心产量因子^[9-10]。理想株型选育可围绕两大方向展开:(1)高光效群体构建:通过培育具有“上稀下密”结构的理想株型,优化群体内部光分布,降低个体间的光竞争,提升中下层叶片的光能截获率,从而增强群体光合效率;(2)抗倒密植型改良:通过缩短株高、调整分枝角度等方式,提升种植密度^[11-12],进而实现光合效率与抗倒性的协同优化^[13]。例如,引入表现为节间缩短、主茎紧凑排列的短茎型性状,有助于实现高密度栽培,在提升土地利用效率的同时有效降低倒伏风险^[14]。

针对我国不同大豆生态区的差异,需以区域适应性为导向,结合分子育种手段开展精准品种改良。东北春大豆区:聚焦功能型代谢物富集,利用单核苷酸多态性(SNP)和分子标记辅助选择(MAS)培育早熟、高产大豆品种^[15-16];黄淮海夏大豆区:利用基因组编辑技术定向提升蛋白含量,并配套开发耐密植株型;南方多作大豆区:通过短季育种技术缩短生育期,培育高蛋白、兼用品质优良的菜用大豆,满足轮作倒茬需求。通过“产量构成解析-株型结构优化-区域精准设计”的技术闭环,可实现从性状单元优化到群体效能提升的系统性跃升,为我国大豆单产提升提供可操作的技术路径与育种方向。

3.2 构建耕作方式与施肥模式同步的土壤管理体系

土壤质量是决定大豆产量和生态可持续性的基础。美国种植者普遍重视土壤管理,通过网格采

样、石灰调酸、有机质投入等技术手段持续改善土壤结构与养分状况,实现生产能力与生态功能的双重提升。相比之下,我国部分主产区面临土壤酸化、板结及养分失衡等问题^[17],亟需构建集成化、科学化的土壤健康管理体系。其中,轮作倒茬是核心手段,秸秆还田是基础保障,科学施肥是关键支撑。

在轮作倒茬方面,应优化大豆与玉米^[18-19]、小麦^[20]等作物的轮作结构,利用作物间养分吸收的差异,调节土壤养分循环,提升土壤通气性与保水性,减少病虫害积累^[21],改善土壤理化性状^[22],为大豆根系发育与群体构建提供良好生态环境。

秸秆还田作为提升土壤有机质含量与活性微生物群落的基础性措施,其生态价值不容忽视。将收获作物秸秆粉碎还田,可有效增强土壤的保水保肥能力^[23-24],提升团粒结构稳定性,激活土壤微生物生态系统,有助于构建功能健全、动态平衡的土壤生态系统。

科学施肥是保障大豆稳产高产的核心技术。应加快建立以土壤定期检测、诊断施肥、调理剂施用为核心的精准施肥机制,推广基于土壤养分诊断的配方施肥与变量施肥技术。针对酸性土壤地区,宜施用有机肥、生物炭、石灰等土壤改良剂^[25-27],提升pH缓冲能力,改善根际环境。冬季间作绿肥作物(如紫云英、黑麦草等)亦可显著提升有机质含量、增强土壤保水能力与生物活性^[28]。此外,推广保护性耕作技术(如免耕、少耕、条耕和深松等)^[29],有助于减少土壤扰动、抑制水土流失,提升大豆生产体系的可持续性生态韧性。

3.3 实施精准播种、冠层优化与营养调控的田间精细管理技术

田间管理水平直接关系到大豆的产量表现与资源利用效率,是现代大豆生产体系中的关键环节。美国高产种植者高度重视播种精度、群体结构调控及养分精准供应等细节,通过精细化田间操作,实现了对产量形成过程的全过程干预,为持续刷新产量纪录提供了技术支撑。借鉴其成功经验,我国亟须构建以精准播种、冠层优化、营养同步供应为核心的集成田间管理技术体系。

在播种环节,应加快先进播种设备与智能播种技术的推广应用。现代播种装备具备高精度定位与均匀播种能力,可实现种子深度与间距的精准控制,有利于种子快速吸收土壤水分与养分,保障苗齐、苗匀、苗壮^[30],为构建理想群体结构奠定基础。科学设计行距和株距,优化空间配置,是提升大豆冠层光合效率的关键。通过适度缩小行距、合理调整株间距,可缓解光竞争、改善冠层光分布结构,确

保群体内叶片均衡受光,进而提升整体光合效率与产量潜力^[31]。

冠层结构调控不仅关系到光能截获,还影响群体通风透光性及病害发生概率。构建“上疏下密、通风透光”的理想冠层,有助于形成高光效、高稳定性的生产群体^[31]。除播种密度外,合理应用调节剂(如控旺剂)与整枝修剪技术,也可进一步优化株型、稳定群体结构。

营养供应方面,需构建基于诊断的营养精准供给机制。依托植物营养诊断技术,定期采集叶片、茎秆等组织样本,精准掌握作物营养状况,结合土壤养分供应特征,实施差异化、阶段性施肥策略,实现“需多少、补多少”的营养精准对接^[32]。该策略不仅可提升肥料利用效率、降低浪费和环境负荷,也为大豆健康生长与品质形成提供养分保障。此外,应强化种植过程中的成本-效益分析,建立科学的投入产出评估机制,引导种植者在稳产的基础上实现收益最大化,推动高产高效大豆生产体系的可持续发展。

3.4 推进绿色防控与智能监测融合的大豆病虫害管理

当前,我国大豆种植过程中单位面积化学农药使用强度较高,不仅对农田生态系统造成持续压力,也潜藏农产品质量安全风险。因此,构建以精准化、绿色化、智能化为核心的病虫害防控体系,已成为保障大豆产业可持续发展的关键任务^[33-34]。

美国在大豆病虫害防控方面形成了较为成熟的绿色防控技术体系,注重低毒高效农药的精准施用,通过精细化管理手段,在保障防效的同时有效控制环境污染和残留风险^[30]。值得我国借鉴的是,其在生产实践中高度重视技术集成与智能化应用,以实现病虫害的实时监测与动态响应。

基于我国农业发展现状,应加快绿色防控体系建设,重点推动低残留生物农药的研发与推广应用,并建立依托物联网、大数据和遥感技术的智慧监测与预警平台,实现主要病虫害的空间分布监控、发生趋势分析与风险等级划分^[35-36]。通过精准预警与防控建议推送,指导种植者开展靶向施策、动态防控,有效避免病虫害大规模暴发与过度用药。

在具体防控措施上,应注重农业、物理与生物等多种绿色技术的协同应用,构建“预防为主、综合防治”的多元化技术体系^[37],如合理轮作、清除田间残株病源,辅以灯光诱杀、色板诱集、天敌释放等绿色物理与生物措施,在降低农药使用的同时,增强农田生态系统自我调节能力,提升防治的系统性与稳定性。

总体而言,大豆病虫害绿色防控的核心在于实现“监测智能化、防控精准化、策略综合化”。通过融合信息技术与生态调控机制,不仅可实现病虫害防控从“治病”向“治未病”转变,更有助于提升农产品质量安全水平,推动大豆产业绿色转型与高质量发展。

3.5 构建应对气候变化的大豆种植动态调控体系

在全球气候变化加剧的背景下,极端天气事件日益频繁,干旱、高温、洪涝等胁迫显著影响农作物稳定增产。构建多维度、系统化的应对策略,已成为提升大豆种植韧性与保障产能的核心课题。美国在应对气候风险方面,已形成以“气象预测+种植管理调控”为主的应对体系。种植者普遍依据历史气象数据与区域气候特点,精准调整播期,力求使大豆生育关键期避开高温胁迫时段,从而减缓高温对花期与结荚的抑制效应。同时,在生产实践中应用夜间灌溉等水资源调控措施,利用夜间温度较低、蒸发减缓的特点,提升水分利用效率,兼顾降温与抗旱需求,增强大豆对热害的适应能力。

我国幅员辽阔,大豆主产区覆盖冷凉、温暖与湿润等多类气候带,受气候异常影响程度更为复杂。当前,提升我国大豆气候适应能力的关键在于构建气候预测、响应、调控三位一体的应对体系。(1)应加强气候变化对农业影响的监测、模拟与评估,建立长期与短期气候预测模型。基于遥感监测、大数据分析和人工智能建模等技术,提供分区域、分品种的播期调整建议与品种优化布局方案,实现“因地制宜、因时而动”的动态应对。(2)推广滴灌、喷灌等高效节水灌溉方式,结合土壤墒情与作物需水规律,精准控制灌溉时机与水量,有效缓解干旱胁迫,提高水分利用效率^[38]。在干旱区,这些技术可确保大豆获得关键时期所需水分,支撑其正常生长发育。(3)针对强降雨频发的南方及中部地区,应加快完善农田排水系统建设,优化排水渠道与田间水利设施布局,确保积水可快速排出,防止因根系缺氧或腐烂导致的产量损失。综上,构建这种动态调控与系统防御体系,有助于提升我国大豆产业在气候不确定性背景下的抗风险能力,实现“稳产保供”的战略目标。

4 结论

美国大豆高产纪录的持续刷新,充分体现了良种、良技、良机与良态优势的集成,源于其对品种遗传潜力的深度挖掘、土壤生态系统的系统构建、光热资源的精准利用、田间关键环节的高效调控、绿色防控体系的集成应用以及应对气候变化的适应

性栽培策略。这些经验充分表明:通过实现品种与环境的精准匹配,推动土壤肥力的定向提升,优化种植密度与营养供给的协同配置,并融合智能化监测和绿色防控技术,能够显著提高大豆群体光合效率与综合抗逆能力。

对于我国而言,应立足主产区在气候条件、土壤特性等方面的区域差异,构建集区域化品种选育、土壤健康管理、精准播种施肥、绿色智能防控与气候适应栽培于一体的多维协同技术体系,从根本上破解当前单产偏低、资源利用效率不高等制约瓶颈。通过推广高效、高产、绿色、可持续的大豆生产模式,不仅有助于加快我国大豆产业转型升级,也将为保障国家粮食安全与农业可持续发展战略目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1] COLE M B, AUGUSTIN M A, ROBERTSON M J, et al. The science of food security[J]. *NPJ Science of Food*, 2018, 2: 14.
- [2] 王曙明, 孟凡凡, 郑宇宏, 等. 大豆高产育种研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 162-166.
WANG S M, MENG F F, ZHENG Y H, et al. Progress of soybean breeding for high yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(9): 162-166.
- [3] USDA Foreign Agricultural Service. World Agricultural Production, 2025. <https://www.fas.usda.gov/>.
- [4] 孙寰. 世界大豆高产新纪录: 10414 公斤/公顷: 访高产记录创造者 Kip Cullers[J]. *大豆科技*, 2010(2): 1-4.
SUN H. A new record of soybean high yield in the world: 10414 kg/ha; An interview with Kip Cullers, the creator of high yield record[J]. *Soybean Science & Technology*, 2010(2): 1-4.
- [5] 孙寰. Kip Cullers 又创大豆高产新纪录[J]. *大豆科技*, 2011(2): 5-6, 16.
SUN H. Kip Cullers set a new record for soybean high yield[J]. *Soybean Science & Technology*, 2011(2): 5-6, 16.
- [6] WINSOR S. Record-setting soybeans: What CCAs should know [J]. *Crops & Soils*, 2021, 54(4): 11-17.
- [7] SALMERÓN M, GBUR E E, BOURLAND F M, et al. Soybean maturity group choices for maximizing radiation interception across planting dates in the midsouth United States [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2132-2142.
- [8] HU M, WIATRAC P. Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: Review[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(3): 785-790.
- [9] PEDERSEN P, LAUER J G. Response of soybean yield components to management system and planting date [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(5): 1372-1381.
- [10] KIM J H, SCABOO A, PANTALONE V, et al. Utilization of plant architecture genes in soybean to positively impact adaptation to high yield environments [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 891587.
- [11] 王晓光, 赵念力, 魏建军, 等. 中黄 35 大豆超高产实例分析

- [J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 1051-1053.
- WANG X G, ZHAO N L, WEI J J, et al. Case analysis of super-high-yielding soybean variety, *Zhonghuang 35* [J]. *Soybean Science*, 2011, 30(6): 1051-1053.
- [12] 李挺, 牛春丽, 杨超, 等. 密度对大豆中黄13性状及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2005(4): 573-574.
- LI T, NIU C L, YANG C, et al. Effects of density on traits and yield of soybean zhong huang13[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005(4): 573-574.
- [13] LIU S L, ZHANG M, FENG F, et al. Toward a “green revolution” for soybean [J]. *Molecular Plant*, 2020, 13(5): 688-697.
- [14] CUI S, MENG Q, GAI J, et al. Gene mapping of brachytic stem and its effects on yield-related traits in soybean[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(8): 774.
- [15] SONG Q, QUIGLEY C, HE R, et al. Development and implementation of nested single-nucleotide polymorphism (SNP) assays for breeding and genetic research applications [J]. *The Plant Genome*, 2024, 17(3): e20491.
- [16] JIA H, SUN B, JIANG B, et al. Natural variations in key maturity genes underpin soybean cultivars adaptation beyond 50°N in NorthEast China[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(7): 3362.
- [17] 郭小燕. 我国耕地地力透支的影响机制及治理对策[J]. *农村经济*, 2020(3): 26-33.
- GUO X Y. The impact mechanism of overdrawn farmland fertility in China and their countermeasures [J]. *Rural Economy*, 2020(3): 26-33.
- [18] SAHA A K, MCMAINE J T, TROOEN T, et al. Impact of no-till, crop rotation, cover crop, and drainage on soil physical and hydraulic properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2024, 88(2): 239-257.
- [19] YAN C, YANG Y, SONG J, et al. Analysis of the beneficial effects of prior soybean cultivation to the field on corn yield and soil nitrogen content [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1413507.
- [20] GENTRY L E, MITCHELL C A, GREEN J M, et al. A diverse rotation of corn-soybean-winter wheat/double crop soybean with cereal rye after corn reduces tile nitrate loss [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13: 1506113.
- [21] HU W, STROM N, HAARITH D, et al. Mycobiome of cysts of the soybean cyst nematode under long term crop rotation [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 386.
- [22] LIU G, HE A, YANG Z, et al. Introducing intercropping into rotation system altered the structure, function and network complexity of soil microbial communities in farmlands of the North China Plain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 211: 106094.
- [23] TANG M, LIU R, LUO Z, et al. Straw returning measures enhance soil moisture and nutrients and promote cotton growth [J]. *Agronomy*, 2023, 13(7): 1850.
- [24] 张国伟, 王晓娟, 杨长琴, 等. 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1493-1501.
- ZHANG G W, WANG X J, YANG C Q, et al. Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1493-1501.
- [25] WU Z, CHEN X, LU X, et al. Impact of combined organic amendments and chemical fertilizers on soil microbial limitations, soil quality, and soybean yield [J]. *Plant and Soil*, 2025, 507(1): 317-334.
- [26] HOU L, WANG Y, WANG Z, et al. Effects of biochar on soil quality in a maize soybean rotation on mollisols [J]. *Agronomy*, 2025, 15(5): 1226.
- [27] 丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 等. 几种改良剂对酸性紫色土氮组分及酶活性的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(9): 150-163.
- DING X R, YAN N Z, WANG Z F, et al. Exploring the effects of several amendments on the nitrogen components and enzyme activities of acidic purple soil [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 46(9): 150-163.
- [28] DING G, LIU X, HERBERT S, et al. Effect of cover crop management on soil organic matter [J]. *Geoderma*, 2006, 130(3/4): 229-239.
- [29] DU C, LI L, EFFAH Z. Effects of straw mulching and reduced tillage on crop production and environment: A review [J]. *Water*, 2022, 14(16): 2471.
- [30] 韩天富, 王彩虹, 曾令清, 等. 美国大豆生产、科研、推广和市场体系(续四) [J]. *大豆通报*, 2006(6): 38-40.
- HAN T F, WANG C H, ZENG L Q, et al. American soybean production, scientific research, extension and market system (continued 4) [J]. *Soybean Bulletin*, 2006(6): 38-40.
- [31] LI R, XU C, WU Z, et al. Optimizing canopy-spacing configuration increases soybean yield under high planting density [J]. *The Crop Journal*, 2025, 13(1): 233-245.
- [32] PENDKE M S, ASEWAR B V, GOURKHEDE P H, et al. Impact of tillage and fertilizer management on Soybean-Cotton rotation system: Effects on yield, plant nutrient uptake, and soil fertility for sustainable agriculture [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 9991.
- [33] 李海涛, 叶非. 杀虫剂和除草剂的植物修复研究进展 [J]. *植物保护*, 2010, 36(1): 28-32.
- LI H T, YE F. Advances in phytoremediation of pesticides and herbicides [J]. *Plant Protection*, 2010, 36(1): 28-32.
- [34] WEI D, KAMEYA T, URANO K. Environmental management of pesticidal POPs in China: Past, present and future [J]. *Environment International*, 2007, 33(7): 894-902.
- [35] WU X, LIU Y, XING M, et al. Image segmentation for pest detection of crop leaves by improvement of regional convolutional neural network [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 24160.
- [36] MCDONALD S C, BUCK J, LI Z. Automated, image-based disease measurement for phenotyping resistance to soybean frogeye leaf spot [J]. *Plant Methods*, 2022, 18(1): 103.
- [37] TRAN D T, MITCHUM M G, ZHANG S, et al. Soybean microbiome composition and the impact of host plant resistance [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 14: 1326882.
- [38] ZHU W, LI J, XIE T. Impact of climate change on soybean production: Research progress and response strategies [J]. *Advances in Resources Research*, 2024, 4(3): 474-496.