

· 评述 · 饲草生物学专辑

加强饲草基础生物学研究，保障饲草种业与国家大粮食安全

景海春^{1,5*}, 王台², 林荣呈³, 曹晓风⁴, 种康^{2*}

¹中国科学院植物研究所北方资源植物重点实验室, 北京 100093; ²中国科学院植物研究所植物分子生理学重点实验室, 北京 100093; ³中国科学院植物研究所光生物学重点实验室, 北京 100093; ⁴中国科学院遗传与发育生物学研究所, 北京 100101
⁵中国科学院植物研究所生态草牧业工程实验室, 北京 100093

摘要 现代科技刚刚进入草牧业领域,“投入少、产出低、平台差”制约了我国饲草育种与产业化发展。尽管目前草牧业蓄势待发,但科技创新不足难以保障我国大粮食安全;且我国开展饲草育种研究的机构和团队屈指可数。为此,我们组织了“饲草生物学”专辑,旨在推动各界关注饲草的科技创新、产业化发展和国家饲草种业安全。

关键词 饲草, 种业, 生物学, 草牧业, 大粮食

景海春, 王台, 林荣呈, 曹晓风, 种康 (2022). 加强饲草基础生物学研究, 保障饲草种业与国家大粮食安全. 植物学报 57, 719–724.

1 饲草产业发展背景与重要性

充足的食物供应和粮食安全是一个民族兴衰和社会发展的物质基础。我国农耕文明延续了5 000多年,是世界上唯一一个文明发展历史没有断层国家。这其中的一个重要原因是对农作物的成功驯化和精耕细作。众所周知,我国的农耕社会产生于春秋战国时期,其基础是小农经济,特点是以铁犁牛耕为耕作方式,以男耕女织(家庭为单位从事生产劳动)为主要组织方式。畜牧养殖在历史上的主要功能是为农业生产提供役畜,因而,饲草作为大型家畜的重要“粮食来源”,长期得不到重视,既未形成健全的产业体系,也未纳入国民经济统计。然而,近年来,“小草大业”和“种草就是种粮”等成为网络热词,引起各界高度关注。何以“草就是粮”?其背后的社会和经济逻辑是什么?随着我国社会经济的快速发展和人民生活水平的大幅提高,畜牧养殖的目的已由主要提供农耕生产的畜力转变为提供居民健康优质的乳、肉产品,从而驱动畜牧养殖业向高度集约化和工业化方向发展,饲草产业也日益受到重视。

2022年“两会”期间,习近平总书记在分析国内和国际形势后,特别提出“大粮食安全”和“大食物观”。如何深刻理解“大粮食安全”的丰富内涵?通过深入分析我国现行粮食消费结构,不难看出饲草已成为“大粮食安全”的重要组成部分。与30年前相比,我国主粮消费占比减少了21%,饲用粮已占粮食消费总量的58%。近10年粮食进口快速攀升,2021年进口粮食 1.64×10^8 t (2022–2028年中国粮食贸易产业竞争现状及发展前景预测报告, <https://www.chyxx.com/industry/1113327.html>),其中饲料粮占76%;与此同时,我国还大量进口了乳和肉产品,2021年乳品进口 3.91×10^6 t (杨祯妮和程广燕, 2022),牛肉进口 2.33×10^6 t (2022–2028年中国牛肉行业市场竞争态势及未来前景分析报告, <https://www.chyxx.com/shuju/1101572.html>),羊肉进口 4.11×10^5 t (中国羊肉市场发展深度研究与未来投资调研报告(2022–2029年), <https://www.chinabaogao.com/data/202201/568877.html>)。造成这一现状的主要原因之一是我国饲草供给严重不足。例如,近70%的草食家畜无稳定优质的牧草供应。2020年,13个牧区省份草产品缺口约 3×10^8 t,

收稿日期: 2022-12-08; 接受日期: 2022-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1003200)和山东省重点研发计划(重大科技创新工程) (2021SFGC0303)

* 通讯作者。E-mail: chongk@ibcas.ac.cn; hcjing@ibcas.ac.cn

我国优质苜蓿干草的自给率仅为64% (金京波等, 2021)。诸如此类的数据表明, 发展饲草产业, 保障我国“大粮食安全”迫在眉睫。近几年, 国家对饲草产业和饲草种业的发展进行了宏观布局, 如制定了《全国现代饲草产业发展规划(2021–2030年)》, 发布了《中华人民共和国主要草种目录(2021年)》, 并出台了《全国草种业中长期发展规划(2021–2035年)》。可见, 发展饲草产业对我国经济和社会发展具有重要意义。

饲草产业是现代生态草牧业的基础。首先, 从生态文明建设方面看, 天然草地的优势种多为优质饲用草种, 维持草地优质草种的比例、盖度和生物量是草原生态保护与可持续利用的核心; 边际土地种植饲草能显著改善土壤结构和培肥地力, 起到碳汇作用(李强和周道玮, 2018)。其次, 从种植制度和国土空间利用方面看, 饲草比粮、棉、油作物具有更广的适宜区域与立地条件, 是合理利用水、土、光和热等自然资源发展新兴应用场景的理想选择。再次, 从畜牧养殖方面看, 优质饲草料供给可有效缓解饲料粮不足的压力, 多元化饲草配方可提升畜群的健康程度, 降低成本(高晶等, 2018)。最后, 基于规模化饲草生产的现代生态草牧业可发展和延深产业链, 增加农村就业, 为农民带来收益, 助力乡村振兴(陈东辉等, 2022)。

2 饲草基础生物学问题

实现饲草产业的良性发展, 必须要有强大的饲草种业支撑。然而, 我国饲草种业目前存在3方面问题。(1) 育成品种少且优异性状不突出。1987–2021年间, 我国仅有657个饲草品种通过审定, 且其生产能力和抗逆性均无法超越引进品种。而美国每年用于生产的豆科饲草品种达4 000多个, 禾本科约1 500个; 另外, 西方发达国家经贸成员国互认的登记饲草品种达5 000多个(金京波和梁承志, 2022), 远高于我国的品种数量。(2) 主栽品种以进口为主(曹丽雯等, 2022)。2021年, 我国商业饲草种用量达 1.5×10^5 t, 其中进口 7.16×10^4 t, 饲草之王紫花苜蓿(*Medicago sativa*) 80%以上用种量依赖进口。(3) 丰富的饲草资源未得到充分发掘。我国草地饲用植物有246科1 545属6 704种, 但无论是国家种质资源库的收集保存量还是育成草类品种数均不到总量的30%。我国是草牧业

生产和畜产品消费大国, 种植业与草牧业比例调整意味着巨大的结构性变革, 草种业是关键核心。

优质饲草种源匮乏的根本原因在于相关领域基础科学研究薄弱, 许多基础生物学问题认识不清。文献分析表明, 1990年中后期我国才开始有相关研究论文发表, 且增长缓慢。截至2021年, 美国在饲草研究领域发文总量达5 800多篇, 居世界首位, 是排名第2的澳大利亚发文量的近3倍; 在排名前20位的国家和地区中, 欧洲占一半以上; 而我国排在第9位。饲草育种研究机构排名前10中, 美国有4家, 法国和英国分别有2家, 中国科学院排在第9位(发文量为500多篇)。由此可见, 我国饲草基础研究起步晚且规模小。在对饲草进行研究时, 需对其有清醒的认识。饲草与粮食作物有明显不同的生物学特性和生产性状, 主要表现在以下3方面。(1) 多数饲草基因组大且高度杂合多倍化, 精准分析难度大; (2) 饲草多具特有的生长繁育特性, 如自交不亲和、近交衰退、克隆生长和耐多次刈割; (3) 饲草的育种目标侧重于高生物量、高蛋白含量和适口性等复杂性状的改良。

此外, 开启饲草基础生物学系统研究, 需厘清以下几个基本问题。(1) 饲草的定义与内涵。草种类的常用词包括饲草、牧草和生态草。生态草主要用于生态修复或城乡生态景观的打造。饲草和牧草多数情况下则可互为通用, 但在服务产业、应用场景、育种目标性状、耕种方式和集约化程度等方面两者存在诸多不同。例如, 饲草更适合界定为一种作物(forage crop), 主要特征是生产性状经过高度人工驯化与遗传改良, 用于规模化、集约化种植生产和定向加工, 成为现代畜牧和养殖行业的标准草产品。牧草(forage grass)则更适合用于天然草地补播和退化草场修复。(2) 饲草种质资源的范畴。通常饲草多为禾本科和豆科植物, 随着遗传改良和加工技术的进步, 饲草的类别不断增加, 如木本的蛋白桑和构树(*Broussonetia papyrifera*), 小灌木的锦鸡儿(*Caragana sinica*)和柠条(*Caragana intermedia*), 以及芦苇(*Phragmites australis*)和芒草(*Miscanthus sinensis*)。那么饲草作物可发掘的植物资源究竟有多少, 它们具有哪些特征? 我们以驯化物种中可用于人类食物和饲料的物种为对象, 按照生长发育特征分析了驯化饲草与驯化作物的关系。研究发现在370 000多种开花植物中, 仅1 000–2 000种得到驯化(图1), 且驯化的物种随机

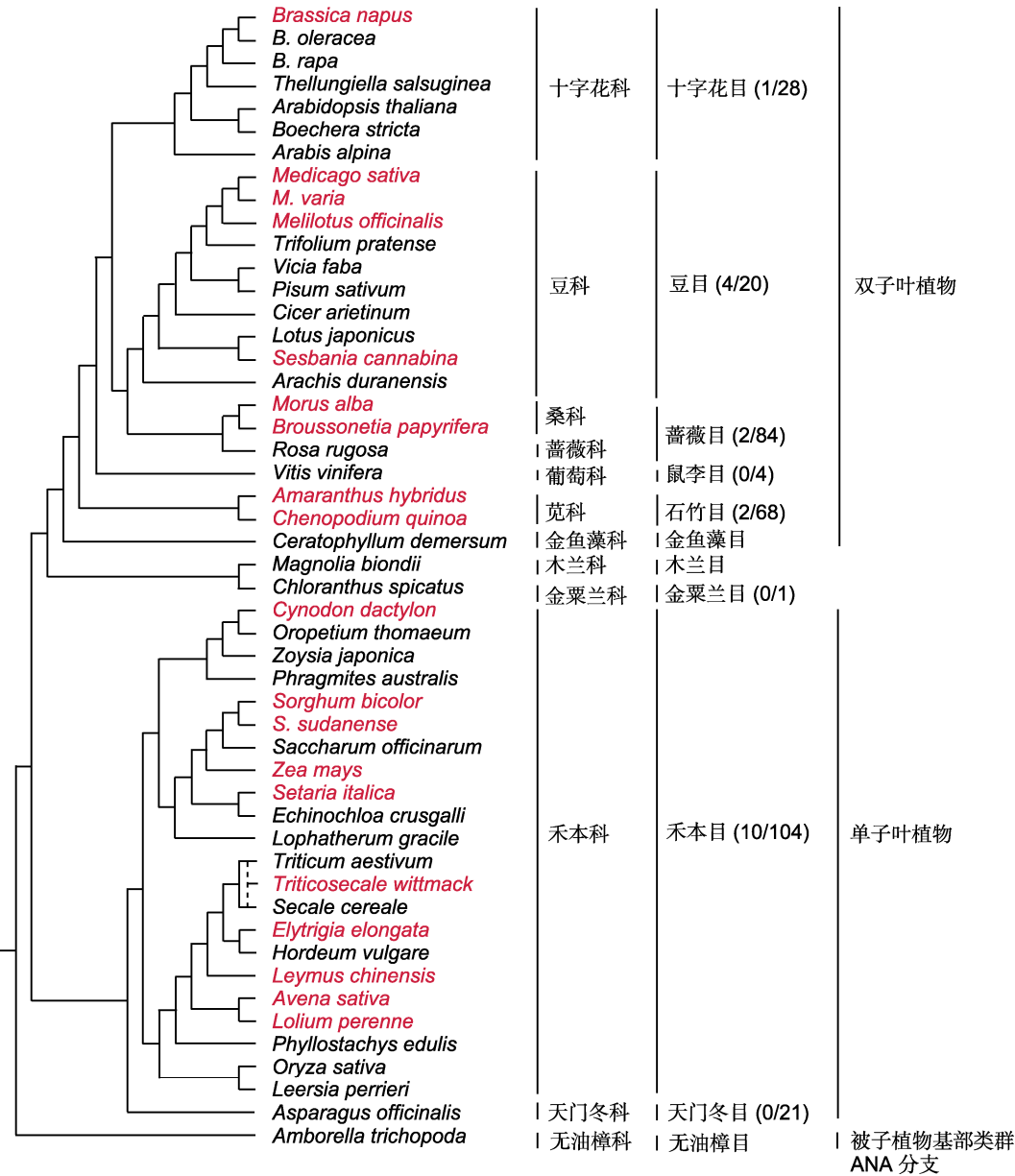


图1 已知的驯化饲草物种分布系统树
每个目后标有饲草和驯化作物的物种数目分布。前者为饲草的物种数, 后者为驯化作物的物种数。本分析聚焦饲草, 尽管有些类群中有驯化的作物, 但由于未包括驯化饲草, 因此未在最终物种树中体现(郭亚龙提供)

Figure 1 Distribution phylogenetic tree of known domesticated forage species
The distribution of the number of species of forage and domesticated crops is indicated after each order. The former is the number of forage species and the latter is the number of domesticated crop species. The analysis focuses on forage, although there are domesticated crops in some taxa, such taxa are not reflected in the final species tree because they do not include domesticated forage (provided by Guo Yalong).

分类分布, 一些科和属相比其它的科或属会包括更多的被驯化作物。例如, 豆科、茄科和禾本科中被驯化的作物比例较高。驯化的944个物种分布在120个科41个目的被子植物中, 在豆目、禾本目、蔷薇目和石

竹目中占比最大。禾本科与豆科饲草的亲缘关系相比同科饲草较远。可见, 饲草资源的发掘潜力巨大。(3) 确定饲草的研究体系与策略。良种对我国主要粮食作物增产的贡献率超过40%, 但饲草育种水平低, 对产

业的贡献率有限。在近万年的作物驯化和农业生产历程中,作物育种技术经历了从原始驯化选育(1.0版)到常规育种(2.0版)再到分子育种(3.0版)等阶段,正向设计育种或智能化育种体系(4.0版)迈进。然而,饲草育种还处于人工表型选育阶段,依赖“老把式”经验育种(金京波等, 2021; 种康, 2022)。当前,迫切需建立起饲草研究范式,以典型饲草种类为模式,系统梳理饲草基础生物学问题,并整合现代基因组学、系统生物学和计算生物学的前沿理论与科技,逐步解析饲草优异生产性状形成的分子基础,快速提升饲草育种水平。

我国水稻(*Oryza sativa*)研究模式的发展历程对饲草科技创新有很好的借鉴和启迪作用。在育种策略上,注重整体思维和系统认识分析技术。例如,中国科学院率先提出的分子模块设计育种和全基因组选择育种;在基因组学和精准育种技术方面,综合利用GWAS、基因编辑和分子模块,实现从野生材料到品种从头设计(如四倍体水稻);利用计算生物学开展复杂基因组组装,新一代基因编辑育种技术精准创制优异等位变异;利用微生物组学技术开展植物根际宏基因组、内生菌与固氮、牧草效应与过瘤胃菌群系统研究。在大数据与合成生物学方面,利用AlphaFold2机器学习方法预测蛋白质结构,开展物种水平基因组合成和新种质从头设计。

3 本专辑结构

本专辑共收录12篇研究进展,涵盖了饲草种质资源、基因组学、特化性状、育种技术、典型与新型饲草和新型饲草产业发展等方面的内容。

洪军和苏红田(2022)介绍了我国牧草种质资源的保护工作进展与发展思路,以期让更多同行了解和参与到牧草种质资源保护和良种繁育工作中来。金京波和梁承志(2022)综述了豆科、禾本科和莎草科等18种饲草的基因组学研究进展,并对饲草基因组未来的研究方向进行了展望。薛勇彪团队分析了饲草自交不亲和性与近交衰退的特化性状,简要综述了5类自交不亲和机制,以及豆科、菊科和禾本科饲草自交不亲和性及其近交衰退的研究进展(赵洪等, 2022)。林浩团队综述了单倍体育种技术研究进展及其在苜蓿等豆科牧草中的应用,重点介绍了新近发展的基因编辑

介导的体内单倍体诱导技术,并对该育种技术在紫花苜蓿等豆科牧草中的应用进行了探讨和展望(王娜等, 2022)。孔照胜等(2022)阐述了豆科饲草碳氮高效固定、转运和同化利用研究进展,特别论述了紫花苜蓿碳氮高效固定、转运和同化利用的育种新思路。景海春团队介绍了甜高粱(*Sorghum bicolor*)育种研究进展及未来发展方向,并分析了当前存在的问题,为未来育种提供了对策(郝怀庆等, 2022)。此外,他们还介绍了黄河三角洲滨海草带建设进展并提出了需要解决的耐盐碱饲草的基础生物学问题(王甜甜等, 2022)。张波和任长忠(2022)总结了燕麦(*Avena sativa*)基因组学与分子育种研究进展,并展望了进入基因组时代的发展趋势。李振声院士团队阐述了长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)分子育种基础研究进展,旨在为我国长穗偃麦草品种选育和“滨海草带”建设提供参考(李宏伟等, 2022)。才宏伟团队系统总结了黑麦草(*Lolium perenne*)生物学研究进展,并提出一些需要解决的生物学问题,为进一步加强黑麦草基础生物学研究和分子育种提供参考(谭文清等, 2022)。范希峰团队综述了狼尾草属(*Pennisetum*)牧草的研究进展,并对今后需开展的工作进行了展望,以促进狼尾草的产业化应用(侯新村等, 2022)。陈良团队分析了新型饲草开发利用的基础生物学问题,并提出了推动新型饲草产业健康发展的策略和建议,以促进新型饲草的种业创新和饲草产业的可持续发展,保障国家粮食安全(曹丽雯等, 2022)。

4 未来可期

据统计,自1997年科技部设立国家重点基础研究发展计划(973计划)至2014年,农业领域设立了60多个研究项目,而草地方面的项目只有4个,且均以生态修复为主。

从国家层面亟须加强我国饲草育种及以下相关基础科学“从0到1”的源头创新。(1) 重要饲草特有生物学性状研究与基因组分子选育技术开发,揭示多倍体杂合基因组演化机理、自交不亲和机制和复杂性状全基因组关联分析等。(2) 饲草分子模块耦合与新品种设计。发展基于整体思维和系统认识的分析技术,在优势底盘品种本底基因组基础上,发展分子模块耦合理论与合成技术,设计理想型新品种。(3) 饲草资

源开发与挖掘新饲草及从头驯化研究。例如, 以盐碱地和边际土壤适生植物(如偃麦草(*E. repens*))和天然草地本土优势牧草(如羊草(*Leymus chinensis*))为研究对象, 开发高效精准的基因编辑技术, 从头驯化本土优势饲草。(4) 发展饲草快速高效制种技术。结合智能植物工厂光温水气营养技术、无损高通量监测技术、新一代传感技术和AI全自动过程控制技术, 研发加速育种和智慧设施农业先进技术。

近10年来, 中国农业大学和山西农业大学等10余所高校相继成立草业相关学院, 18所高校设置了草业科学专业, 主要包括草地科学、草学、牧草与草坪草种子学、草地资源与生态、牧草与草坪草育种学、草坪管理学、草地保护学、植物生态学、草产品生产和草地与牧场管理学等。当前开展苜蓿研究的机构有兰州大学、中国农业大学、中国农业科学院和北京林业大学等12家科研院所和高校; 开展羊草研究的机构有中国科学院植物研究所、中国科学院遗传与发育生物学研究所、内蒙古大学和中国农业科学院等8家科研院所和高校; 开展燕麦研究的有国家燕麦改良中心、内蒙古农牧业科学院和中国农业大学等9家科研院所和高校。实验材料主要为苜蓿、甜高粱、饲用玉米(*Zea mays*)、燕麦和羊草等, 围绕种质资源、生物学特性、生物多样性和耐逆等方面开展研究。为实现饲草种源自主可控, 我国需建立国家级饲草育种与产业科技创新平台, 从而构建前沿理论、分子设计、技术集成和产品创制创新链; 并组建草牧业国家工程中心, 围绕牧草品种产业化, 开展牧草良种制种关键技术集成, 优化种植和水肥施入方式及种子田间杂草和病虫害防除方法, 提升水肥耦合水平, 集成提高种子结实率的相关关键技术, 制定栽培管理技术规程, 提高牧草种子产量。为确保商品种子质量, 应根据不同草种特点, 确定种子加工过程中的关键控制点, 制定种子清选、分级、检验、包装及存贮配套技术规程和标准, 以实现我国优质牧草种子自我供给, 摆脱牧草种子依赖国外进口的困境。

近年, 饲草种业备受关注。在国家自然科学基金委“双清论坛”、“香山论坛”和“草种业前沿”等高端论坛上, 饲草种业成为核心主题。此外, 国家在重大科技计划中也加大了饲草基础生物学与育种创新的支持力度。中国科学院率先布局了草牧业先导专项。我们相信在不久的将来, 我国饲草基础生物学研

究与饲草种业科技水平将会实现大幅跃升。

参考文献

- 曹丽雯, 卢蕊, 范吉标, 胡龙兴, 陈良 (2022). 新型饲草开发利用的基础生物学问题. 植物学报 57, 826–836.
- 陈东辉, 孙莉莉, 张培奇, 范亚旭 (2022). 强化党建引领 赋能乡村振兴. 农民日报. 12-02 (004).
- 种康 (2022). 种康: 生物育种锻造农业“芯片”. https://www.cas.cn/zjs/202201/t20220119_4822791.shtml. 2022-12-09.
- 高晶, 唐增, 李重阳 (2018). 中国城乡居民食物消费碳排放的对比分析. 草业科学 35, 2022–2030.
- 郝怀庆, 张汝, 卢呈, 罗洪, 李志刚, 尚丽, 王宁, 刘智全, 吴小园, 景海春 (2022). 甜高粱育种研究进展及未来展望. 植物学报 57, 774–784.
- 洪军, 苏红田 (2022). 我国牧草种质资源保护工作进展与发展思路. 植物学报 57, 725–731.
- 侯新村, 腾珂, 郭强, 赵春桥, 高康, 岳跃森, 范希峰 (2022). 狼尾草属牧草研究进展. 植物学报 57, 814–825.
- 金京波, 梁承志 (2022). 饲草基因组学研究进展. 植物学报 57, 732–741.
- 金京波, 王台, 程佑发, 王雷, 张景昱, 景海春, 种康 (2021). 我国牧草育种现状与展望. 中国科学院院刊 36, 660–665.
- 孔照胜, 杨文强, 王柏臣, 林荣呈 (2022). 豆科饲草碳氮高效固定、转运和同化利用研究进展. 植物学报 57, 764–773.
- 李宏伟, 郑琪, 李滨, 李振声 (2022). 长穗偃麦草分子育种基础研究进展. 植物学报 57, 792–801.
- 李强, 周道玮 (2018). 草地管理对土壤碳截获的影响. 安徽农业科学 46(23), 1–5, 8.
- 谭文清, 陈军, 才宏伟 (2022). 黑麦草生物学研究进展. 植物学报 57, 802–813.
- 王娜, 姜腾, 王彬锡, 牛丽芳, 林浩 (2022). 单倍体育种技术研究进展及其在苜蓿等豆科牧草中的应用. 植物学报 57, 756–763.
- 王甜甜, 曹丽雯, 刘智全, 杨庆山, 陈良, 陈敏, 景海春 (2022). 黄河三角洲滨海草带建设的饲草基础生物学问题. 植物学报 57, 837–847.
- 杨祯妮, 程广燕 (2022). 2021年奶类消费情况及2022年趋势研判. 中国乳业 (8), 2–5.
- 张波, 任长忠 (2022). 燕麦基因组学与分子育种研究进展. 植物学报 57, 785–791.
- 赵洪, 宋丽珍, 张玉娥, 程佑发, 薛勇彪 (2022). 饲草自交不亲和性与近交衰退. 植物学报 57, 742–755.

Strengthen the Research of Forage Basic Biology to Ensure Forage Seed Industry and National Food Security

Haichun Jing^{1, 5*}, Tai Wang², Rongcheng Lin³, Xiaofeng Cao⁴, Kang Chong^{2*}

¹Key Laboratory of Plant Resources, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²Key Laboratory of Plant Molecular Physiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ³Key Laboratory of Photobiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ⁴Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ⁵Engineering Laboratory for Grass-based Livestock Husbandry, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract Modern science and technology have just been entering the field of grass-based livestock husbandry, and “less input, low output and poor platform” restrict the development of forage breeding and industry in China. Although the development of grass-based livestock husbandry is ready to take off, the lack of scientific and technological innovation is difficult to ensure China’s food security; furthermore, there are few institutions and teams that focus on forage breeding research in China. Therefore, we organize the special issue ‘Forage Biology’, aiming to promote public awareness of the scientific and technological innovation, industrial development and national forage seed industry safety.

Key words forage, seed industry, biology, grass-based livestock husbandry, great food security

Jing HC, Wang T, Lin RC, Cao XF, Chong K (2022). Strengthen the research of forage basic biology to ensure forage seed industry and national food security. *Chin Bull Bot* **57**, 719–724.

* Authors for correspondence. E-mail: chongk@ibcas.ac.cn; hcjing@ibcas.ac.cn

(责任编辑: 孙冬花)