

· 研究进展 ·

# 基于大食物观的草地农业发展趋势及关键科学问题<sup>\*</sup>

侯扶江 李 岚 宁 娇 娄珊宁  
李春杰 沈禹颖 南志标<sup>\*\*</sup> 任继周<sup>\*\*</sup>

兰州大学草地农业科技学院 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室/农业农村部草牧业创新重点实验室/国家林业草原西北退化草原生态修复与利用工程技术研究中心,兰州 730020

**[摘要]** 大食物观下,国家食品安全的重点是饲料粮安全。草地农业是全球最重要的食物生产系统之一,既直接生产草畜产品,又间接地为食物生产提供生态保障,满足国家对食品安全、生态安全和边疆稳定不断增长的刚性需求。目前,草地农业保障国家食品安全的水平亟待提高,支撑国家高质量发展的能力亟待加强。种子是草地农业的物质基础,天然草原和栽培草地(也称“人工草地”)是草地农业生产食物的主要基地,草地保护为草地农业开展食物生产“保驾护航”,草地农业系统耦合促进食物生产的效益放大。草地农业是基础性战略产业,保障国家食品安全的水平依靠基础研究的创新。为此,本文分析了草类种质资源挖掘利用与种子生产控制、牧草优质高产栽培与转化、草原生态生产力维持与修复、草地有害生物管理、草地农业系统耦合与管理等5个方面的研究进展,并提出对应的关键科学问题。

**[关键词]** 草原;栽培草地;种质资源;生物灾害;生产层;界面;系统耦合;草业科学

## 1 大食物观的内涵

大食物观是保障国家粮食安全、生态安全和社会安全稳定的根本,通过维持或提升食物生产系统的生态生产力,满足人体能量和营养需求,全面维护人体健康。人类的食物生产绝大多数依靠耕地、草地、水域和林地,其生态生产力是确保该生态系统健康的前提下生产食物的能力,即生态系统结构与功能改善、食物产量和品质提升、经济收益可持续增



**任继周** 兰州大学教授,中国科学院院士。从事草地农业生态系统、农业系统发展史、农业伦理学研究。创立了草原气候—土地—植被综合分类法、草原季节畜牧业理论、评定草原生产力的新指标“畜产品单位”。发表专著18本。获得国家科技进步奖二等奖、何梁何利科技进步奖、国家教学成果特等奖等。



**南志标** 兰州大学教授,中国工程院院士。从事退化草地治理、草类植物病害防治和牧草种质资源评价与品种选育等方面的研究。培育牧草新品种4个,发现真菌新种3个。发表学术论文320余篇,主编出版著作4部。兼中国草学会理事长。获得国家科技进步奖二等奖和三等奖、国家级教学成果特等奖、全国五一劳动奖章、中国植物病理学会和中国草学会终生成就奖等。



**侯扶江** 兰州大学教授。教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,教育部“草地农业系统耦合与管理”创新团队带头人。主要在我国西部开展草业试验研究和示范推广。兼任《草业科学》主编、中国草学会草地生态专业委员会主任等。获国家级教学成果特等奖、国家科技进步奖二等奖、甘肃省科技进步奖一等奖等。

收稿日期:2023-08-14;修回日期:2023-11-13

<sup>\*</sup> 本文根据国家自然科学基金委员会第313期“双清论坛”讨论的内容整理。

<sup>\*\*</sup> 通信作者,Email: renjiz@lzu.edu.cn; zhibiao@lzu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U21A20242, 32161143028)的资助。

加。大食物观的食物生产涉及环境保护、种植、养殖、加工、贮运、消费等多个维度,要在多个时空尺度上平衡时、地、度、法之维<sup>[1]</sup>。草地农业(Grassland Agriculture、Prataculture)的术语出现于40多年前<sup>①</sup>,它以草地资源为基础,是包含前植物、植物、动物和后生物四个生产层的农业系统<sup>[2]</sup>。它是最重要的食物生产系统之一,其占据的世界陆地面积、耕地面积及拥有的从业人口具绝对优势,生产全球80%以上的牛肉和牛奶,饲喂全世界70%以上的绵羊(*Ovis aries*)和山羊(*Capra aegagrus hircus*)<sup>[3]</sup>。

人类的食物分为矿物性食物、以矿物性食物为基础的植物性食物(含菌类等)和动物性食物(图1)<sup>[4]</sup>,在我国人民膳食中(除去饮水)分别占0.3%、65.2%和34.5%<sup>[5]</sup>。人类食物结构正在发生深刻变革,口粮消费下降、动物性食物上升,我国尤为明显,我国居民人均口粮消费从1986年的207.0千克/年下降到2022年的136.8千克/年,城镇人口人均口粮消费不足80千克/年<sup>[6]</sup>;我国蔬菜、水果和水产品产量分别占全球60%、30%和40%以上(联合国粮食及农业组织,2021),超过世界平均水

平。畜产品人均消费量从25千克/年增加到91千克/年,牛羊肉消费量占肉类总量比例从不足5%提高到18%<sup>[6]</sup>。2008—2022年,我国牛羊等草食畜肉产量占肉类总量12%~14%,人均产量是世界平均水平的2/3<sup>[7]</sup>,饲料用粮占粮食产量70%左右,这一刚性需求快速的增长势头仍未停止,对国际市场依存度超过到76%<sup>[8]</sup>。因此,大食物观下,国家食品安全的重中之重是饲料粮安全,这是农业结构优化和草地农业发展面临的重大机遇。

大食物观下,草地农业的前植物生产层开展景观生产,产出生态产品,既保证自身的健康,也为耕地、水域、林地等其他生态系统的食物生产和资源高效利用提供生态安全保障;植物生产层提供量多质优的草类产品,动物生产层提升饲草转化效率;外生物生产层开发促进草食家畜转化的功能性草产品,改进草畜加工贮运,降低食物损失,同时扩大人类食物来源,提高人体健康水平(图2)。与传统农业相比,草地农业生产链长、复杂且完整,生产的食物种类丰富,四个生产层蕴含众多“耦合键”,易与其它产业发生系统耦合,提升草地农业的比较效益(图2)。

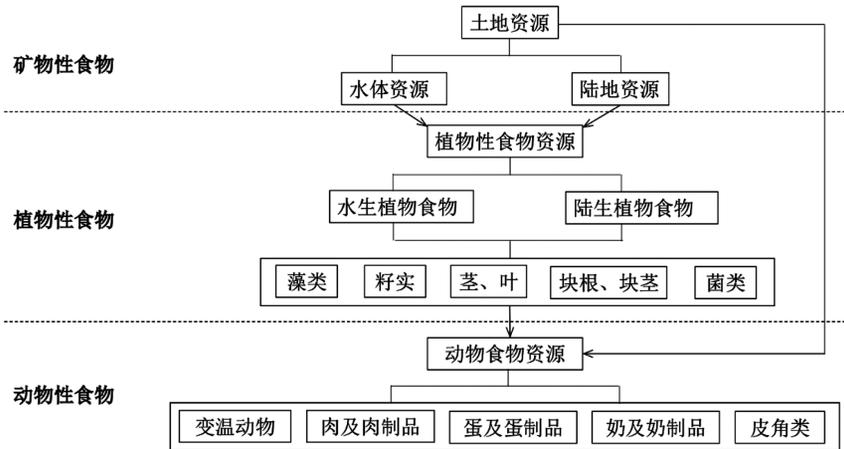


图1 人类食物构成图<sup>[4]</sup>

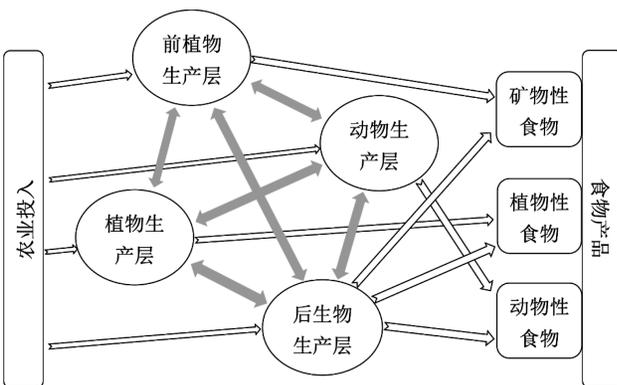


图2 草地农业系统的4个生产层与食物生产功能<sup>[4, 9]</sup>

## 2 我国草地农业的发展现状

### 2.1 草地农业保障国家食物安全的水平亟待提高

农业生产结构向草地农业转型,改革供给侧的畜产品生产结构,适应人民食物结构变革。我国以全球8.3%的草地、7.4%的耕地、6.9%的林地、6.0%的淡水资源养活了近20%的人口,创造了世界奇迹,也造成巨大的生态、生产与社会协调发展的压力。全国退化草原面积曾一度达到90%,目前仍有70%<sup>[10]</sup>;中低产田占耕地面积的70%;全国2022

① 南志标等,对草地农业的若干认识和思考,任继周草地农业学术思想研讨会,2023,兰州。

年化肥用量比1990年增加一倍,粮食产量仅提高57.7%;大豆进口依赖度达81.8%以上,未来进口可能至少占48%,占国际市场38%<sup>[11]</sup>,根本原因是草地农业科技自主创新不足制约了国家食物资源自给。

全国牧草总产量从2009年 $4.8 \times 10^8$ 吨,逐步增加到2020年的 $5.3 \times 10^8$ 吨,草原牧区生产的牛羊肉奶占全国比例从2003年的20%增长到2020年的40%左右,但草食畜禽需草量仍存在 $1.4 \times 10^8$ 吨缺口<sup>[12]</sup>,占21.1%。据中国工程院预测<sup>[13]</sup>,我国发展草地农业,未来十年可增加牛羊肉产量 $5.0 \times 10^6$ 吨左右,做到供需平衡、基本自给,而不影响粮食生产;反之,则需大量进口牧草、饲料、牛羊肉和奶制品。我国饲料粮是人口粮的2.5倍,全球饲料粮超过粮食总产一半,欧盟比重达60%,美国饲料粮比例更高,我国从国际市场购粮的难度增加;国际局势也加剧了我国饲料供给的风险。草地农业对于国家食物安全、甚至总体安全具有无可替代的作用。

世界草原和耕地生产了61.7%的草食畜肉,高收入国家耕地种草提供了79.1%的肉类和83.2%的草食畜肉<sup>[14]</sup>。现代化农业系统中,耕地种草不少于1/4,家畜生产超过农业总产值的一半,其中草食家畜举足轻重。我国人民动物性蛋白摄食量约为日本的3/4和韩国的7/10(联合国粮食及农业组织,2021),这种提升空间是发展草地农业的动力<sup>[15]</sup>。发达国家栽培草地与天然草原面积比超过1/10,我国仅为1/33左右,加上草原改良面积约1/20<sup>[2]</sup>。我国天然草原的生产力与美、澳等相比,荒漠不到1/3,典型草原约为1/3~2/3,草甸草原约2/3;草原生态修复后,荒漠和典型草原的生产水平分别可达其56.8%和50%~90%,草甸草原与之持平<sup>[14]</sup>。

我国有适宜发展草地农业的边际土地,沿海滩涂151.23万公顷,耕地撂荒200万公顷/年<sup>[16]</sup>。我国是世界三大盐碱化土地国家之一,耕地盐碱化面积达760万公顷,酸化土地2.04亿公顷;大量的撂荒田、农闲田未加利用<sup>[17]</sup>。草地农业收获植物营养体,充分利用光、热、水、土等资源,承受寒、旱、涝、风沙等自然灾害的能力强<sup>[18]</sup>。因此,利用边际土地建立草地农业系统、开展食物生产的潜力巨大。

## 2.2 草地农业支撑国家高质量发展的能力亟待加强

国家食物需求战略转型推动我国草地农业进入高速发展期,二十多年来,国家系统地实施了“退耕还林(草)”“天然草原保护”“草原生态保护补助奖励机制”“振兴奶业苜蓿发展行动计划”“粮改饲”等重大草业生态和生产工程,优质草产品为社会高速发展提供了重要的物质基础。全国草业年产值超过7000亿元,草产品加工、草食畜生产规模企业近1600家,34.6%位于牧区半牧区<sup>[19,20]</sup>。但我国草地农业仍有巨大发展空间,2021年,我国苜蓿刈割面积3069万亩,产量400万吨,分别为美国的1/3和1/25;优质苜蓿单产514千克/亩,为美国的84%,粗蛋白较低且不稳定<sup>[21]</sup>。我国草种生产只能满足40%的需求,其中54%的生态草种和90%以上的观赏草种依赖进口,苜蓿草种80%进口<sup>[2]</sup>。

草原牧区和半农半牧区是我国少数民族集中分布区,全国659个少数民族县(旗)中597个分布在草原区,生活着55个少数民族,1.2亿人口<sup>[22]</sup>。牧区经济结构单一,草原畜牧业生产经营方式相对粗放,基础设施落后,亟需现代化转型。国家每年直补农牧民约168亿元的政策性收入,然而六大牧区农牧民人均收入仍然只有全国农民人均收入的74%,不及东部发达省份的一半<sup>[7]</sup>。与此同时,草原牧区牛羊肉、牛奶、毛绒产量占全国同类产品的比重分别达到39.2%、30.0%和70.2%,而且占比呈上升趋势<sup>[7]</sup>。发展草地农业可为边疆民族地区发展提供战略保障。

“丝绸之路”是草原之路。我国草原90%分布在古代“丝绸之路”沿线,沿线中亚各国的草原面积分别占其国土面积的26.4%~67.9%,哈萨克斯坦和蒙古国草原退化面积分别占到其草原面积的60%和70%<sup>[23,24]</sup>。草原生态修复保障食物安全和生态安全是“一带一路”国家共同的战略需求,协同创新草地农业模式,发挥各自的科技、资源、市场等优势,可拓展我国食物生产空间。通过国际合作把饭碗更加牢固地端在自己手里,这是全球视野的大食物观。

## 3 草地农业研究现状与趋势

我国草业科学起步晚于国外约半个世纪,但是发展快,在基础研究领域组织了重点基础研究发展规划、重点研发计划、基础研究十年规划等,推动我

国草业科学研究进入快车道。1981—1990年、1991—2010年、2011—2021年3个时段年均发表论文数量分别是1980年以前的11.6、102.9和187.5倍,国际影响力较高的科研产出增加更快。过去70余年,我国建立了较为完整的草业科学理论与方法论体系,草地农业生态系统的理论体现了我国重大理论创新能力和较强的系统观,然而一些研究方向与国际先进水平仍有一定差距。

草地农业统筹草地、林地、耕地、水域和其它土地资源开展食物生产(图3),草种是草地农业的物质基础,天然草原和栽培草地仍然是草地农业的主要生产资料和系统耦合的主要“反应灶”。草地保护通过生物灾害防控为草地农业的健康“保驾护航”。草地农业系统耦合的根本目的是效益放大,这是生物、非生物环境和社会劳动三个因子群相互作用的必然结果,是开放系统的标志性特征,也是草地农业发展的动力。为此,主要围绕这五个方面分析草地农业研究的现状与趋势。

### 3.1 草类种质资源挖掘与种子生产

牧草优质高产一定程度上取决于种质资源,这是育种的驱动力。牧草产量形成,国内外主要研究粗蛋白、可溶性糖、纤维素等饲用品质形成机理<sup>[25, 26]</sup>,筛选关键基因。我国在高粱(*Sorghum bicolor*)耐盐碱、蒺藜苜蓿(*Medicago truncatula*)抗性改良育种和杂种优势利用、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)耐寒和抗病、白花草木樨(*Melilotus albus*)香豆素和象草(*Pennisetum purpureum*)花青素等合成的分子基础取得突破<sup>[27-29]</sup>,阐明了箭筈豌豆

(*Vicia sativa*)和老芒麦(*Elymus sibiricus*)裂荚、落粒等性状的生物学基础<sup>[30, 31]</sup>。牧草分子育种,国际报道了多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、蒺藜苜蓿和百脉根(*Lotus corniculatus*)等基因组,促进饲草作物改良<sup>[31]</sup>。我国在羊草(*Leymus chinensis*)基因组测序、美洲狼尾草(*Pennisetum glaucum*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*)等特异分子标记和遗传转化等取得突破<sup>[2]</sup>,研究思路 and 前沿领域的探索与国际基本同步。

牧草育种和种子生产。牧草是经济发达国家的重要作物,育种与种子生产属农学(Agronomy)范畴,牧草种子要实现规模化和精准化生产。紫花苜蓿等牧草是美国三大作物之一,年登记苜蓿品种50~60个,产业化的牧草品种约4500余个,我国通过国审的牧草品种年均20个左右,以传统育种技术为主,新品种多追求高产,种子质量偏低,生产效率低于先进国家一半以上,种子生产调控的研究集中于紫花苜蓿、鸭茅、多年生黑麦草、燕麦(*Avena sativa*)、黑麦(*Secale cereale*)等重要牧草<sup>[31, 32]</sup>,相关评价对牧草利用关注不够,草类育种、种子生产和牧草利用相互脱节。国外形成草类多目标育种的趋势,由单一高产转变到高产、优质、多抗、节水、宜机作业、固碳、环境友好等综合生产性能,发展相关的育种理论与方法。2023年,全国草种需求16万~20万吨,其中饲草和生态用种分别约6万~8万吨和6万~7万吨,每年进口草种约10万吨<sup>[33]</sup>,产需关系表明我国草类种子生产的基础研究与国际先进水平差距较大。

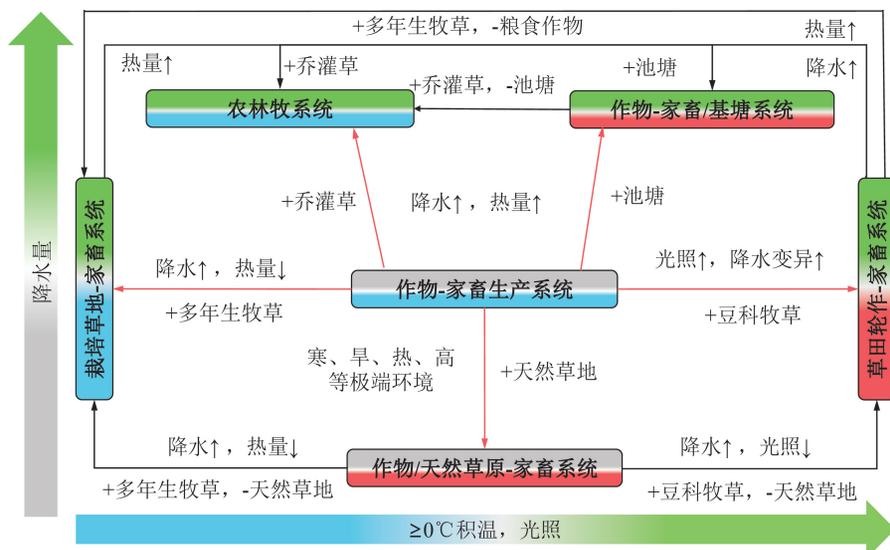


图3 草地农业系统耦合形成的食物生产系统<sup>[3]</sup>

### 3.2 牧草优质高产栽培与高效利用

牧草种植模式主要包括牧草与粮食/经济作物轮作或复种、作物粮饲兼用、粮草间作、林(果)草间作等,其中粮草耦合在全球较为普遍,约占耕地面积的 70%<sup>[34]</sup>。研究主要关注栽培草地产量形成规律与资源利用效率,尤其是混播、轮作、杂草管理等多物种互作机制、豆科牧草生物固氮与氮素利用效率等<sup>[35-37]</sup>。在旱区,还重视栽培草地水分利用效率与区域尺度的水分平衡<sup>[38, 39]</sup>。在大尺度上,田间试验与植物生长模型、草畜互作模型、农业经济模型有机结合探索模式优化与机理<sup>[40, 41]</sup>。美国和加拿大以放牧为纽带,发展草田轮作、多年生草地与一年生草地耦合的作物一家畜综合生产系统;北美大平原南部传统的棉花、小麦种植系统 1/2 的耕地建立棉花/一年生禾草轮作系统,放牧肉牛,灌溉减少 20%,化肥投入下降 38.7%,效益增加 13%<sup>[3]</sup>,成为北美牛肉生产重要模式之一。我国 20 世纪 80 年代研制了黄土高原草地农业模式,在北方粮食主产区,以豆科牧草种植为基础,草田轮作,粮食单产提高 60%,施肥量下降 1/3,经济效益翻番,大面积推广,增粮、增畜、增收、增肥<sup>[42]</sup>。我国贵州草地农业模式,草地载畜量和家畜生产力达到新西兰的生产水平<sup>[43]</sup>,与稻/草轮作或复种、冬闲田种草等相结合,推动南方丘陵区发展草地农业<sup>[44]</sup>。全球耕地一半以上是盐碱地,禾豆混播或草田轮作用于家畜放牧,是盐碱地改良与利用最有效的方式之一<sup>[45]</sup>。我国对粮经草三元结构和功能有工作积累,在重点草业经济区组织粮草间作、牧草复种、粮饲兼用等集成、攻关,重点是水肥耦合与增碳减排的理论与技术模式,为发展我国草地农业 2.0 夯实基础。

牧草栽培利用在欧洲有较长历史,建立了放牧、刈割、刈牧兼用、青贮与干草调制等牧草高效利用与转化的理论与技术模式,逐渐推广到南北美洲、澳洲等,当前研究突出智能化管理、土草畜微生物互作机制与调控等,包括牧草加工的生物添加剂、草产品增质提效的利用与加工等理论与模式<sup>[46]</sup>。我国阐明了青贮牧草蛋白降解的理论<sup>[47]</sup>,2022 年 7 月批准 80 家公司生产国外 166 种添加剂产品,美加两国和欧盟近年分别注册干草和青贮饲草添加剂 137 种和 73 种,这也是基础研究体现于产业的差距,制约着我国“粮改饲”的高质量发展、草产品质量与比较效益的提升等。

### 3.3 草原生态修复与利用

过去三十多年,草原研究主要围绕维持或提升

草原的生态系统服务功能,包括动植物生产力和物种多样性等传统热点方向。国外重视草原退化机理与生态修复,补播、施肥、补水等农艺措施修复草原、发展半栽培草地等研究历史悠久。发达国家将草原培育的研究拓展到非洲和中亚的传统牧区,既丰富了作为研究对象的草原类型,又弥补了研究内容的结构性短板。我国系统地研究了草原生产力,提出了草畜系统相悖导致草原退化的论断,建立以系统耦合为特征的退化草原修复理论与模式、草原健康的 CVOR(condition, vigor, organization, resilience)评价方法、退化草原的放牧修复模式,推行近自然修复的模式<sup>[48-50]</sup>,在草原牧区、半农半牧区等大规模推广<sup>[51]</sup>。放牧家畜是草原物质和能量的“搬运工”,是各种草原管理措施的“启动子”和“放大器”,是人类管理莽莽草原必不可少的“助手”,放牧管理可以调控草原群落组成和土壤性状等<sup>[52, 53]</sup>,此类研究需加强。

草原对全球变化的响应与适应性管理国内外研究基本同步。主要是降水、氮沉降、增温及其组合以及极端气候等模拟,探讨草原生产力、生物多样性、多样性—多功能性关系、地—地—地下反馈等,卫星与无人机遥感、大数据挖掘等结合揭示草原结构与功能的响应机制。国际在草原碳固存等研究成果广泛应用于草原管理的实践,我国适应性管理集中于草原生态补偿,开始尝试碳交易,其它多止于基础研究层面。放牧管理全球一半以上的陆地生态系统,包括绝大多数草地、林地和耕地,全球变化背景下草原对放牧的响应等试验研究亟待加强<sup>[54]</sup>。过去 160 多年,全球草原 10%~20% 受到木本植物入侵<sup>[55]</sup>,人类在草原植树的热情日益高涨,这与开垦、过度放牧都是草原退化的重要原因<sup>[56]</sup>,但长期的综合效应尚不得而知。

我国在环境—草原—家畜—人居互作的系统性学术思想处于国际水平,顶层设计与理论研究国际领跑,前沿领域的探索与国际并跑,草原研究与产业结合有一定特色,主要研究方向的突破性成果发表在 *Science*、*Nature* 等期刊<sup>[57, 58]</sup>。定量了全球和区域尺度上放牧、补播、施肥等草原管理措施的增碳潜力<sup>[58]</sup>,测算了青藏高原等生态脆弱区草原的载畜量<sup>[59, 60]</sup>,明确了干旱加剧长期放牧对地下生物多样性的负面效应<sup>[54]</sup>。我国地域广阔、草原类型齐整,野外台站分布广、代表性强,科研积累逐渐丰富,建设协同科研平台有望快速提升基础研究

水平。

### 3.4 草地有害生物管理

国外系统、综合地研究了草地重要生物灾害的发生规律,积累了生物、非生物和社会劳动因素三类因子群的数据,构建了主要生物灾害的发生模型,明确了病、虫、毒害草和啮齿类等有害生物相互之间的致灾关系<sup>[2]</sup>。我国确定了西部草原 30 种左右主要害虫,阐明了紫花苜蓿异茎点霉根腐病和黄萎病、沙打旺(*Astragalus laxmannii*)黄矮根腐病、红豆草(*Onobrychis viciifolia*)和箭筈豌豆炭疽病等 20 多种新病害及其对牧草产量和品质的影响,对棘豆属(*Oxytropis*)和黄芪属(*Astragalus*)及其产苦马豆素的内生真菌等研究较为深入<sup>[2]</sup>。草地生物灾害控制的研究,正在从资源的视角重新认识有“害”生物,目的从“灭”向“控”转变,把有害生物数量控制在经济阈值和生态阈值之下;目标从单一有害生物向一种有害生物为主、兼顾其它生物或对多种有害生物整体防控转变,兼顾草原多功能性;措施由直接灭除向生产与生态兼顾的多要素间接调控转变,开展机械化、智能化的绿色、精准防控<sup>[61]</sup>;效果评价由有害生物数量向生态系统多功能性转变<sup>[62, 63]</sup>;单调型的防控理论和技术模式向系统型发展。草地有害生物绿色防控的观念逐渐成为共识,根据有害生物发生数量、损失水平和防治成本,确定防治阈值、生育期和作业时间;用生态防治措施,禁施有残留农药。我国建立了苜蓿蚜虫和蓟马等虫害的预测模型<sup>[2]</sup>,正在加强对其它牧草和有害生物致灾因素的定量贡献、预测预报模型等研究。

草地有害生物用于医药和工业原料有悠久的历史。与传统牧草一样,毒害草同属草类两大功能组之一,一般占全球草地植物种的 16.8%~26.8%、生物量的 7.3%~15.7%,在退化草地占比甚至超过一半,是草地生产力和生物多样性的重要组成部分,对于草原结构与功能的稳定具有不可或缺的作用<sup>[51, 64]</sup>。相对于传统牧草,“毒害草”本质上是功能性乡土草(Functional Native Herbage, FNH),家畜虽然在生长季较少采食,却对家畜放牧行为、消化代谢、生产力、免疫功能、瘤胃内环境、肠道甲烷排放等有调控作用<sup>[64, 65]</sup>,还有其他我们尚未掌握的功能。有“益”毒害草的引种驯化选育、有效次生代谢产物的鉴定和提取、对土—草—畜—微生物的作用机理等尚需进一步研究,推动产品研发。有“害”生物是生态系统重要的组分,其肆虐是草原退化的标志,也

是草原退化的结果,草原培育与放牧结合可有效控制草原啮齿类和毒害草等<sup>[63, 66]</sup>。正确认识、科学管理、合理利用有“害”生物,变害为利、变废为宝,将生物灾害防治纳入草原资源利用与管理体系统,此类研究正在快速推进。

### 3.5 草地农业系统耦合与管理

系统耦合是普遍的自然现象和社会现象,是生态系统的基本属性,是两个或者多个生态系统相互亲和、结合为一个更高层次的、具有独特结构与功能的生态系统的过程<sup>[67]</sup>。草地农业是典型的自然—人类耦合系统(Coupled Natural and Human Systems, CNH)<sup>[68, 69]</sup>,是多个尺度的生态系统通过三个界面过程发生系统耦合的产物,其本质是促进效益放大,这是草地农业可持续性的经济基础(图 4)。目前主要讨论概念,或在大中尺度分析案例,有少量农户调查的半定量研究<sup>[70]</sup>。我国草地农业的理论与实践是对国际学术界的重大贡献,包括草地农业四个生产层的理论、系统耦合与系统相悖的理论、季节畜牧业的理论、草地农业生产力的评价体系、草业专家系统等<sup>[2]</sup>。草地农业根据气候条件,与耕地、林地、水域等发生系统耦合,演化出多样化的食物生产系统,不仅扩大了人类食物来源和食物种类,而且稳定了食物生产(图 3)。三十多年前,国家自然科学基金开始支持内陆干旱区调整种植结构,草田轮作、耐盐牧草种植、草畜耦合改良盐渍化土壤,建立了“山地—绿洲—荒漠耦合系统(Mountain Oasis Desert Coupling System, MODS)”<sup>[71]</sup>,在全球具有普遍的示范效应<sup>[18]</sup>。一批重大和重点基础研究项目的成果推动了黄土高原巨型畜牧业基地建设、草原生产现代化转型等<sup>[2]</sup>。草地农业系统耦合研究过去多以农耕区为“反应灶”,需要开拓以草原牧区为“反应灶”的试验研究。草

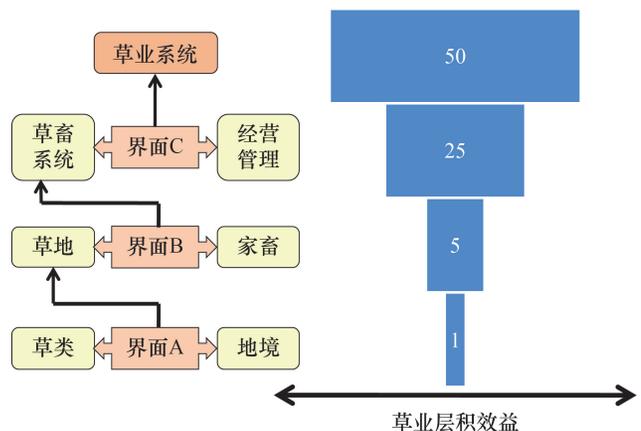


图 4 草地农业生态系统的 3 个界面与系统耦合的效益放大<sup>[1]</sup>

地农业通过牧场、生态区、国家、大洲等多时空尺度的系统耦合,包括陆海界面系统耦合,缓解了农业土地资源的压力,丰富了优质畜产品供应,提高各种食物生产系统的结构和功能以及全球食物供给水平<sup>[72, 73]</sup>,全球食物生产的系统耦合亟待研究拓展。

#### 4 草地农业关键科学问题

大食物观下,草地农业既直接生产量足质优的草畜产品,还间接地为食物生产提供生态安全的保障,以景观产品和物质产品保证人类食物安全,既是绿水青山,又是铁(饭)碗粮仓。国家对食品安全、生态安全和农牧区社会安全是长期的刚性需求,生态安全和社会安全为食物安全提供自然和社会环境的保障,我国人口与社会发展对这些刚性需求迅猛增长,草地农业成为历史的必然选择<sup>[74]</sup>。大食物观下,草地农业的食物生产主要有这 5 个方面的科学问题(图 5),草类种质资源挖掘利用与种子生产控制奠定物质基础,草地有害生物管理分别为栽培草地和天然草原的食物生产提供生物安全保障,它们既是草地农业系统耦合与管理的依据,又是调控对象(图 5)。

##### 4.1 草类种质资源挖掘利用与种子生产的机理与模式

该方向研究重点关注典型生态区域乡土草种质资源收集与评价,性状遗传基础解析与优异功能基因筛选。重要基因挖掘与功能验证,新种质定向聚

合创制。乡土草驯化与选育,注重改良乡土草落粒、裂荚、败育、休眠等不利于种子生产的性状,挖掘和利用 FNH 资源。大食物观的牧草新品种选育与种质评价,重点是多尺度、重要生产性能的生态系统评价方法以兼顾生产、生态和社会发展,家畜等“用户”有“一票否决权”<sup>[75]</sup>。种子生产控制的理论与模式,包括种子生产、加工、贮藏、流通、使用等质量控制和标准化管理等。重要生产性状包括高产、多抗、营养品质、抗倒伏和落粒等。建立性状筛选标准,注重品种审定的差异化。

##### 4.2 牧草优质高产栽培与转化的理论与模式

重要牧草优质高产高效生产的理论与模式,包括生理生态学基础、牧草和草种生产的栽培管理、混播草地草种组合等。草田轮作系统生产力形成、资源利用及其调控机理与途径,包括饲草作物群体结构、水分与养分管理、耕作措施等效应,光、热、水、肥、土优化配置等。栽培草地退化机理与生产力修复的机理与模式,包括盐碱沙化草地土壤养分、水分、有机碳运转,生产与生态功能的稳定性,草地生态生产力修复的经济阈值、效益评估等。饲草高效转化与草畜循环的机理与调控,包括土—草—畜—微生物互作、牧草收获与草产品生产等。

##### 4.3 草原生态生产力维持与修复的理论和模式

草原生产力和生物多样性的形成与稳定性机制,监测、评估与预测的理论与方法,草原群落构建、营养网结构与物流能流特征。草原生态修复的理论与模式,草原健康的生物学与生态学基础与评价,包

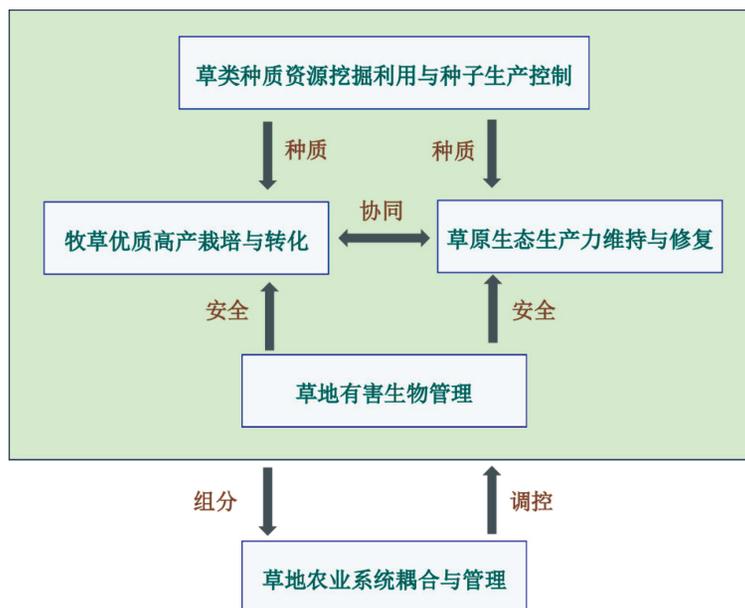


图 5 草地农业系统大食物生产的关键科学问题

括草原营养平衡、草原靶向修复与近自然恢复、草原培育改良、弃耕地定向演替、乔灌木优化配置等。草原放牧理论与模式,包括放牧系统类型及其时空格局、放牧制度与方法、草畜互动、载畜量和放牧行为、目标放牧和放牧/火烧等。草原适应与管理的理论,草原温室气体排放与增碳减排、对全球变化的响应等。牧场环境—草—畜—人—微生物反馈机理,草原智慧管理的理论与方法。

#### 4.4 草地有害生物管理的理论与模式

栽培草地病原种类及其生物学特点,主要病原与寄主植物互作的生理生化及其分子机制,病害发生规律与监测预警机制,有益微生物筛选与生态防治剂等。栽培草地害虫的分布和发生规律、驱动因子、预测模型,重要害虫基因组学及其危害的分子机理。草原害虫与天敌、人类活动的关系,害虫监测预警机制。草原啮齿类致灾规律、关键因子与生产防控理论,对全球气候变化和人类活动的响应,鼠害监测预警机制。重视有害生物的资源属性,发挥其对草地农业的重要作用,包括 FNH 资源收集评价与创新利用、草类源农药等。草地有害生物信息化管理平台、监测与预警网络。栽培草地杂草管理的经济阈值与生态防控的模式与机理。

#### 4.5 草地农业系统耦合与管理的理论与模式

草地农业系统类型及其时空格局、演替与调控、生态生产力形成等机制,包括物质和能量循环。草地农业绿色高效安全生产的理论,包括放牧与补饲、舍饲、刈割结合,资源综合开发与利用,气象灾害发生机制与预警等。大食物观的食物绿色生产理论与技术,核心目标最终是降低碳排放,当前是单位食物当量的碳减排。草地农业系统耦合模式与调控,包括系统耦合的尺度效应与优化、乔灌木草畜耦合、农(牧)场内外草畜耦合、农牧区耦合与陆海耦合等。草业经济与农牧区社会发展,包括家庭牧场类型、结构的多样性与管理,草地资源优化配置,系统高效生产、转化、加工与市场化管理的智能体系。草地农业生态系统健康管理的理论与模式,包括应对全球变化的适应性管理、碳平衡与能量平衡管理、农业伦理与人类健康。草地农业智慧管理,包括数据库和数字化系统、人工智能和大数据分析、机器学习等。

草地农业是基础性战略产业,大食物观下,主要体现在保障国家食物安全和生态安全的水平,以及可持续的支撑中华民族伟大复兴的动力,包括草地农业的食物生产力及其为主体的主要食物生产系统

的健康,草地农业与耕地农业等为重要支撑的华夏农业伦理的传承<sup>[1]</sup>,其根本途径是草地农业系统性的科技振兴,需要多学科协作、多资源共享,将人才培养、平台建设与科技创新有机融合<sup>[76]</sup>。我国草地农业历史悠久,目前生产力不高、可持续性不强、食物生产结构性短缺,因为草地农业基础研究和应用基础研究不足,限制了草地农业技术模式的突破,需要以全面、系统、普遍联系的观念布局和发展草地农业科技,扭转“脖子疼医脖子”的局面,我们亟待补课。

#### 参 考 文 献

- [1] 任继周. 中国农业现代化基准线的农业伦理学界定. 草业学报, 2020, 29(12): 1—4.
- [2] 南志标, 侯向阳. 草地农业的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2023.
- [3] 侯扶江, 南志标, 任继周. 作物—家畜综合生产系统. 草业学报, 2009, 18(5): 211—234.
- [4] 任继周, 侯扶江. 改变传统粮食观, 试行食物当量. 草业学报, 1999, 8(专辑): 55—75.
- [5] 中国营养学会. 中国居民膳食指南—2022. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
- [6] 国家统计局. 居民收入与经济增长基本同步, 消费支出实际增速略有回落. (2023-01-18)/[2023-08-17]. [http://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202302/t20230202\\_1896744.html](http://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202302/t20230202_1896744.html)
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴—2023. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [8] 娄珊宁, 侯扶江, 任继周. 用食物当量评价草地农业的生产力. 草业学报, 2019, 28(12): 1—16.
- [9] 任继周. 草地农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [10] 国家林业和草原局. 国务院新闻办就“十四五”林业草原保护发展规划举行发布会. (2021-08-20)/[2023-08-017]. <https://www.forestry.gov.cn/ghzj/1609/20210831/154957076315803.html>.
- [11] Wang YC, Ling XX, Ma CM, et al. Can China get out of soy dilemma? A yield gap analysis of soybean in China. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(4): 47.
- [12] 侯扶江, 贾倩民, 杜鹤辰, 等. 草地农业系统的结构与功能. 见九三学社中央委员会: 草原生态文明建设蓝皮书(2012—2022). 北京: 学苑出版社, 2023.
- [13] 旭日干, 任继周, 南志标, 等. 保障我国草地生态与食物安全的战略和政策. *中国工程科学*, 2016, 18(1): 8—16.
- [14] 侯扶江, 王春梅, 娄珊宁, 等. 我国草原生产力. *中国工程科学*, 2016, 18(1): 80—93.
- [15] 任继周, 胥刚, 李向林, 等. 中国草业科学的发展轨迹与展望. *科学通报*, 2016, 61(2): 178—192.
- [16] Guo AD, Yue WZ, Yang J, et al. Cropland abandonment in China: patterns, drivers, and implications for food security. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 138154.

- [17] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室, 自然资源部, 国家统计局. 第三次全国国土调查主要数据公报. 自然资源通讯, 2021(17): 7—8.
- [18] Hou FJ, Jia QM, Lou SN, et al. Grassland agriculture in China—a review. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(1): 35—44.
- [19] 新华网, 刘加文: 我国草原的变革与发展. (2019-01-17)/[2023-08-17]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2019-01/17/c\\_1124003985.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2019-01/17/c_1124003985.htm).
- [20] 农业农村部畜牧兽医局, 全国畜牧总站. 中国畜牧兽医统计-2020. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [21] 张林萍, 走出一条质量高、效益好、结构优的新路子—第三届世界苜蓿大会(中国会场)综述. (2023-03-27)/[2023-08-17]. <https://www.farmer.com.cn/2023/03/27/99925041.html>.
- [22] 中国绿色时报. 草原具有钱库重要功能——国家林业和草原局草原管理司有关负责人阐释草原“四库”功能. (2022-06-09)/[2023-08-17]. <http://www.forestry.gov.cn/main/3957/20220609/103952618390080.html>.
- [23] Karnieli A, Gilad U, Ponzet M, et al. Assessing land-cover change and degradation in the Central Asian Deserts using satellite image processing and geostatistical methods. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(11): 2093—2105.
- [24] Hilker T, Natsagdorj E, Waring RH, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 418—428.
- [25] Wang CM, Yan T, Xie KL, et al. Determination of maintenance energy requirement and responses of dry ewes to dietary inclusion of lucerne versus concentrate meal. *Animal*, 2021, 15(5): 100200.
- [26] Wang CM, Hou FJ, Wanapat M, et al. Assessment of cutting time on nutrient values, *in vitro* fermentation and methane production among three ryegrass cultivars. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2020, 33(8): 1242—1251.
- [27] 刘志鹏, 周强, 刘文献, 等. 中国牧草育种中的若干科学问题. *草业学报*, 2021, 30(12): 184—193.
- [28] Wu F, Duan Z, Xu P, et al. Genome and systems biology of *Melilotus albus* provides insights into coumarins biosynthesis. *Plant Biotechnology Journal*, 2022, 20(3): 592—609.
- [29] Yan Q, Wu F, Xu P, et al. The elephant grass (*Cenchrus purpureus*) genome provides insights into anthocyanidin accumulation and fast growth. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(2): 526—542.
- [30] Li YD, Nan ZB, Matthew C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungus changes alfalfa (*Medicago sativa*) metabolites in response to leaf spot (*Phoma medicaginis*) infection, with subsequent effects on pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) behavior. *New Phytologist*, 2023, 239(1): 286—300.
- [31] 南志标, 王彦荣, 贺金生, 等. 我国草种业的成就、挑战与展望. *草业学报*, 2022, 31(6): 1—10.
- [32] 师尚礼. 西部旱区寒区草类植物种质资源研究现状与发展机制. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 81—91.
- [33] 国家林草局国有林场和种苗管理司. 2023年全国草种供需分析报告. (2021-11-20)/[2023-08-17]. <https://www.forestry.gov.cn/main/586/20221120/215148550687091.html>.
- [34] 联合国粮食及农业组织. 2021年世界粮食和农业领域土地及水资源状况报告, 罗马, 2022.
- [35] Kamran M, Yan ZG, Ahmad I, et al. Assessment of greenhouse gases emissions, global warming potential and net ecosystem economic benefits from wheat field with reduced irrigation and nitrogen management in an arid region of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 341: 108197.
- [36] Kamran M, Yan ZG, Chang SH, et al. Enhancing resource use efficiency of alfalfa with appropriate irrigation and fertilization strategy mitigate greenhouse gases emissions in the arid region of Northwest China. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108715.
- [37] Ahmad I, Yan ZG, Kamran M, et al. Nitrogen management and supplemental irrigation affected greenhouse gas emissions, yield and nutritional quality of fodder maize in an arid region. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107650.
- [38] Kamran M, Yan ZG, Chang SH, et al. Interactive effects of reduced irrigation and nitrogen fertilization on resource use efficiency, forage nutritive quality, yield, and economic benefits of spring wheat in the arid region of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2023, 275: 108000.
- [39] Kamran M, Yan ZG, Jia QM, et al. Irrigation and nitrogen fertilization influence on alfalfa yield, nutritive value, and resource use efficiency in an arid environment. *Field Crops Research*, 2022, 284: 108587.
- [40] Baum ME, Sawyer JE, Nafziger ED, et al. Evaluating and improving APSIM's capacity in simulating long-term corn yield response to nitrogen in continuous- and rotated-corn systems. *Agricultural Systems*, 2023, 207: 103629.
- [41] Agnolucci P, Rapti C, Alexander P, et al. Impacts of rising temperatures and farm management practices on global yields of 18 crops. *Nature Food*, 2020, 1(9): 562—571.
- [42] 任继周, 林慧龙. 农区种草是改进农业系统、保证粮食安全的重大步骤. *草业学报*, 2009, 18(5): 1—9.
- [43] 任继周. 回溯中国西南岩溶地区草地—畜牧系统的开发研究. *草业学报*, 1999, 8(S1): 1—11.
- [44] 李向林, 任继周. 南方草地农业模式及潜力. (2009-10-14)/[2023-11-13]. [https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-conference-cn\\_meeting-14916\\_thesis/020221274691.html](https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-conference-cn_meeting-14916_thesis/020221274691.html).
- [45] 任继周. 划破草皮改良草原. 兰州: 甘肃民族出版社, 1965.

- [46] 王天威, 钟瑾. 创制现代草产品加工科技体系 保障大粮食安全. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 675—684.
- [47] Guo X, Zhou H, Yu Z, et al. Changes in the distribution of nitrogen and plant enzymatic activity during ensilage of lucerne treated with different additives. *Grass and Forage Science*, 2007, 62(1): 35—43.
- [48] 任继周, 南志标, 郝敦元. 草业系统中的界面论. 草业学报, 2000, 9(1): 1—8.
- [49] Wang YX, Sun Y, Chang SH, et al. Restoration practices affect alpine meadow ecosystem coupling and functions. *Rangeland Ecology & Management*, 2020, 73(3): 441—451.
- [50] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 等. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. 科学通报, 2020, 65(34): 3898—3908.
- [51] 侯扶江, 李岚, 娄珊宁, 等. 草原生态保护与修复. 见九三学社中央委员会: 草原生态文明建设蓝皮书(2012—2022). 北京: 学苑出版社, 2023.
- [52] You Y, Ren JF, Wu J, et al. Forage taste agents modifying yak grazing decrease soil microbial diversity in alpine meadow. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104160.
- [53] Fan QS, Ren JF, Ma ZW, et al. Taste agents as modulators of the feeding behaviour of grazing yaks in alpine meadows. *animal*, 2023, 17(2): 100703.
- [54] Zhang MN, Delgado-Baquerizo M, Li GY, et al. Experimental impacts of grazing on grassland biodiversity and function are explained by aridity. *Nature Communications*, 2023, 14: 5040.
- [55] Gherardi LA, Sala OE. Enhanced precipitation variability decreases grass- and increases shrub-productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(41): 12735—12740.
- [56] Fujimori S, Wu WC, Doelman J, et al. Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. *Nature Food*, 2022, 3(2): 110—121.
- [57] Bai YF, Han XG, Wu JG, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181—184.
- [58] Bai YF, Cotrufo MF. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603—608.
- [59] Li C, Fu B, Wang S, et al. Climate-driven ecological thresholds in China's drylands modulated by grazing. *Nature Sustainability*, 2023, 6(11): 1363—1372.
- [60] Wang Y, Lv W, Xue K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3: 668—683.
- [61] 孙义, 侯扶江, 刘阳, 等. 一种采用机械化防治草原鼠害的方法: 中国, ZL201610057819.0, 2019-02-05.
- [62] Wang YX, Sun JA, Hou SJ, et al. Plateau pika burrowing and yak grazing jointly determine ecosystem greenhouse gas emissions of alpine meadow. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3914—3925.
- [63] Wang YX, Sun Y, Liu Y, et al. Ecological thresholds of toxic plants for sheep production and ecosystem multifunctionality and their trade-off in an alpine meadow. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116167.
- [64] Xie KL, Liu FY, Zhang C, et al. Nitrogen utilisation, energy utilisation and methane emissions of sheep grazing in two types of pasture. *animal*, 2023, 17(2): 100705.
- [65] Cui XX, Wang ZF, Yan TH, et al. Modulation of feed digestibility, nitrogen metabolism, energy utilisation and serum biochemical indices by dietary *Ligularia virgaurea* supplementation in Tibetan sheep. *animal*, 2023, 17(8): 100910.
- [66] Wang YX, Yuan H, Zhang XL, et al. Tibetan sheep grazing modifies rodent density and their interactions effect on GHG emissions of alpine meadow. *Scientific Reports*, 2019, 9: 17066.
- [67] 任继周, 贺达汉, 王宁, 等. 荒漠—绿洲草地农业系统的耦合与模型. 草业学报, 1995, 4(2): 11—19.
- [68] Liu J, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 1258832.
- [69] Frachetti MD, Smith CE, Traub CM, et al. Nomadic ecology shaped the highland geography of Asia's Silk Roads. *Nature*, 2017, 543(7644): 193—198.
- [70] 彭露茜, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原—青藏高原过渡带农户生产系统的经济效益——以通渭—渭源—夏河样带为例. 科学通报, 2018, 63(2): 201—214.
- [71] 任继周, 侯扶江. 河西走廊山地—绿洲—荒漠系统耦合的调控机理与优化模式. 国家自然科学基金资助项目研究成果年报. 北京: 高等教育出版社出版, 2003.
- [72] 任继周. 中国亟需从陆地农业到陆海农业的战略转移——中国实现农业现代化的最后一个台阶. 草业学报, 2020, 29(8): 1—5.
- [73] Huang JK, Neufeld LM, Badiane O, et al. Equitable livelihoods must underpin food systems transformation. *Nature Food*, 2022, 3(6): 394—396.
- [74] 侯扶江. 中国草原生产力与粮食安全研究. 北京: 科学出版社, 2017.
- [75] Lou SN, Ning JA, Zhang C, et al. Multi-scale evaluation of dominant factors (MSDF) on forage: an ecosystemic method to understand the function of forage. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2163.
- [76] 武维华. 加强草学基础理论研究 服务国家生态文明建设. 中国科学基金, 2023, 37(4): 527.

## Development Trends and Key Scientific Issues of Grassland Agriculture Based on the Big Food View

Fujiang Hou      Lan Li              Jiao Ning              Shanning Lou  
Chunjie Li        Yuying Shen        Zhibiao Nan\*        Jizhou Ren\*

*State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems/Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Engineering Technology Research Center for Ecological Restoration and Utilization of Degraded Grassland in Northwest China, National Forestry and Grassland Administration, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020*

**Abstract** From the perspective of ‘Big Food’, the safety of feed grains is a key focus of food security in China. Grassland agriculture is one of the most important food production systems in the world, which not only directly produces grass and livestock products, but also indirectly provides ecological protection for food production, meeting the growing rigid demands of the country for food security, ecological security, and border stability. Still, we need to improve the capacity and level of grassland agriculture to ensure food security and support high-quality development of China. Seeds are the material foundation of grassland agriculture, and natural grasslands and cultivated grasslands (formerly known as artificial grassland or sown grassland) are the main bases for grassland agriculture to produce food. Grassland protection serves as an “escort” for grassland agriculture to carry out food production, and the coupling of grassland agriculture system promotes the amplification of food production benefits. Grassland agriculture is a fundamental strategic industry, and the level of which relies on innovation in fundamental research to ensure national food security. Therefore, we analyzed the research progress in five aspects, including exploration and utilization of grass germplasm resources and seed production control, cultivation and transformation of high-quality and yield of grass, the maintenance and restoration of grassland ecological productivity, grassland pest management, and grassland agricultural system coupling and management, and thus proposed corresponding key scientific problems.

**Keywords** grassland; cultivated grassland; germplasm resources; biological disasters; production layer; interface; system coupling; pratacultural science

(责任编辑 刘敏 张强)

\* Corresponding Authors, Email: renjiz@lzu.edu.cn; zhibiao@lzu.edu.cn