

作物-家畜综合生产系统

侯扶江, 南志标, 任继周

(草地农业教育部工程研究中心 甘肃省西部草业工程技术研究中心 农业部草地农业生态系统学
重点开放实验室 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:作物与家畜是农业系统的核心组分,相互作用推动农业系统不断进化。作物-家畜综合生产系统中,作物生产与家畜生产之间构成较为完整和通畅的物流与能流网络,它经历了6个演化阶段:原始的食物收集系统(OHF)→原始的作物-家畜综合系统(OICL)→粗放的专门化生产系统(ES, ESC和ESL)→粗放的作物-家畜综合系统(EICL)→集约化的专门生产系统(IS, ISC和ISL)→集约化的作物-家畜综合系统(IICL),经过2次专门化和3次整合,表现为螺旋式上升的趋势。主要综合系统类型包括传统的作物-家畜综合生产系统(C-ICL)、作物/天然草地-家畜综合生产系统(ICL-R)、草田轮作-家畜综合生产系统(ICL-CF)、栽培草地-家畜综合生产系统(ICL-SP)、农林牧复合系统(ICL-W)和作物-家畜/基塘综合生产系统(ICL-P),相互之间沿着一定的环境梯度演替。集约化系统主要存在于发达国家和地区,粗放型在发展中国家和落后地区较为普遍,两者在系统结构、作物与家畜的互作模式、外部投入与生产力水平、生产目的等方面明显不同。作物-家畜互作对农业系统中土壤、植物、微生物、家畜、营养物质循环、能量平衡和经济效益有显著作用。国内外对作物-家畜综合生产系统的内涵、发展阶段、结构与功能的研究有诸多异同,但是尚存在研究对象不全面,尺度单一,方法不可靠,主要针对的是作物系统,及能流分析与物流分析脱节等问题。

关键词:农业;作物;家畜;作物-家畜综合生产系统;混合农业系统;能量平衡分析;放牧

中图分类号:S314;S8-05 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2009)05-0211-24

* 作物-家畜综合生产系统(integrated crop-livestock production system)是作物生产与家畜生产相耦合的草地农业系统,也是世界最重要的食物生产系统,在全球占绝对优势。拥有耕地面积约13.5亿hm²,占世界耕地的89.7%;从业人口54.7亿,占地球人口的84.1%^[1]。生产全球50%以上的肉类,包括88.5%的牛肉、61.0%的猪肉和26.0%的禽肉;年产牛奶5.4亿t,占全球的87.7%,饲养全世界70%的绵羊(*Ovis aries*)和山羊(*Capra aegagrus hircus*)^[2,3]。

人口迅猛增长,能源与环境压力日益增大^[4],世界各国均不遗余力地调整农业结构,试图通过改善作物与家畜的耦合机制,提高系统生产力,降低环境与市场风险,满足人民对食物数量和质量的需求,这是世界性的农业科学命题。然而,由于对作物-家畜综合系统缺乏足够的理论认识与管理技术,各国农业结构调整均出现了这样或那样的问题,集中表现为难以协调食物安全与生态安全。本研究拟通过分析作物-家畜综合系统的内涵、进化与类型,揭示作物与家畜互作机制,分析综合系统的研究现状,力求为不同生态区域农业系统结构调整、可持续农业系统建设提供决策依据。

1 作物-家畜综合生产系统的内涵

农业生产方式的多样性主要取决于系统中作物生产或家畜生产的有无,以及两者互作模式^[5]。作物-家畜综合生产系统过去以“混合系统”(mixed system)为常用术语,又称作物-家畜综合农业系统(integrated crop-livestock agricultural system)、作物-家畜混合系统(mixed crop-livestock system)、混合农业系统(mixed farming system)、作物-家畜系统(crop-livestock system)或综合农业系统(integrated agricultural system, IAS)。作物-家畜综合系统始终处于连续变革之中,以满足不断增长的食物需求。尤其二战后,人类发展观巨变,不断充实和完善农业系统的实践内涵,各种形式的综合系统虽共性结构与功能日趋明确,却难以定义。根据作物与家畜

* 收稿日期:2009-02-22;改回日期:2009-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(30771529),公益性行业计划项目(nyhyzx07-022)和“十一五”科技支撑项目(2006BAD16B06)资助。

作者简介:侯扶江(1971-),男,河南扶沟人,博士,副教授。E-mail:cyhoufj@lzu.edu.cn

的相互作用,对于综合系统的理解可分为6类。

1)突出作物生产与家畜生产空间共存,但不强求两者之间存在必然联系。Mortimore^[6]把家畜生产和作物生产发生在相同地点的农业系统作为混合农业系统。不排除两者“混”而不“合”。“合”即系统耦合。

2)强调作物生产与家畜生产的联系,却不刻意二者空间相容。畜牧与环境发展政策工具箱(livestock, environment and development toolbox, LEAD)认为,作物栽培与家畜饲养整合后就是混合系统,包括依靠附近农场提供饲料的家畜生产系统。认同“合”而不“混”。

3)重视作物与家畜的空间相容与互作。国际农业研究磋商组织(Consultative group on international agricultural research, CGIAR)把作物与家畜整合在同一个农场的生产系统称为混合农业系统。作物生产与家畜生产“混”而“合”,但不强调两者的互作强度,或许只有微弱联系。

4)确定作物生产与家畜生产的互作强度。Seré 和 Steinfeld^[1]认为混合系统中家畜饲料10%以上来自于作物副产品、留茬,或者10%以上的系统产值来自家畜以外的农业活动。强调“合”的强度,重视“合”的平衡,作物生产和家畜生产不能畸轻或畸重,但不关心“合”的机制。

5)明确作物生产与家畜生产的互作机制。Aguiar 和 Botero^[7]认为作物、树木、动物等组分相互作用形成综合系统,各子系统之间协同互惠,一个子系统的产出(主要是废弃物)常常作为另一个子系统的投入。譬如,家畜排泄物促进作物生产,作物秸秆发展家畜生产。专门化系统的物流与能流容易阻滞、累积^[8],综合系统作物与家畜互作构成完整的营养物质循环网络^[7],资源利用效率高,废弃物排放少,环境负面效应小,具备有机农业(organic agriculture)的主要特征^[9,10]。

6)确认放牧是作物与家畜的互作途径。Carr^[11]认为在北美大平原作物一家畜综合系统占不到10%的农业用地,放牧与否为主要判据。放牧是重要的有蹄类-植物互作方式,作物一家畜的物质循环通过放牧自然发生^[12,13]。由于放牧缺失,工厂化农业生产威胁环境与食物安全^[14,15]。

显然,作物一家畜综合系统至少包含作物生产和家畜生产2种基本成分,通过二者相互作用发生与发展,2种生产子系统之间构成循环的物流与能流网络,一个子系统的废弃物可以用作另一个子系统的原料,以维持系统营养物质与能量平衡。研究综合农业系统,主要揭示作物、家畜及其与环境(自然与社会环境)的互作过程,明确系统行为的生产与生态效应,发展生产与生态“双赢”的调控技术。与综合系统相对的是作物或家畜专门化生产系统。

2 作物一家畜综合农业系统的演化

农业自从1万多年前在肥沃新月形带(fertile crescent)和中国起源以后^[16],加速了人类经济、政治和科技发展^[17,18]。社会进步又强化了作物与家畜互作,推动了农业系统演化^[18,19]。各个地理区域,农业系统的演化存在时间不齐整性与行为差异,但表现出相似的作物一家畜互作序列。

2.1 亚洲

任继周等^[20]对比世界农业系统演化进行研究,认为中国农业经历4个阶段。1)自然农业阶段,采集、渔猎。2)农业的自发阶段,始于伏羲时代,种草养畜。3)现代农业阶段,种植业生产亚阶段始于神农时代,垦草造田数千年延续至今^[21];机械生产亚阶段,农业逐渐步入工业化阶段,作物与家畜的联系被斩断。4)农业持续发展阶段,即草地农业阶段,可持续发展的理念指导农业系统自觉地开展植物生产与动物生产的耦合,重要判据之一是动物生产占农业系统的60%以上^[22]。我国农业系统发展的特点在于畜牧文明与种植业文明历史上长期对抗与融合^[23],专门化系统与综合系统在粗放的管理水平上频繁更替,发展脉络稍显错杂。

Pingali^[24]主要以亚洲为例,指出农业系统经历了4个发展阶段。

1)前集约化阶段(preintensification phase)。人口压力小,土地资源丰富,农业生产依赖于劳动力投入,外部投入很少。作物生产和家畜生产独立进行,专门化系统占优势。

2)集约化阶段(intensification phase)。作物和家畜通过牧草、畜力和粪肥相联系。物物交换,作物种植者获得畜产品和粪肥^[25],家畜饲养者获得作物产品和饲草料,系统耦合简单却有效。与现代集约化农业相比,这个阶段粗放得多:农业机械依靠畜力;交通不发达,动物生产规模受限于周围农田的饲料供给^[8];本质上是松散而粗放

的综合生产系统。

3) 收入多样化阶段(income diversification phase)。外部投入增加,以提高牧草质量,保证牧草供应。农牧之间传统的物物交换依然存在,但草田轮作盛行^[8],家畜厩肥或豆科作物的生物固氮推动综合系统发展。

4) 专门化阶段(specialization phase)。特点是工业化生产。由于石油化工、交通运输、农业育种等领域的科技进步,作物与家畜异地规模化生产具备技术与经济可行性^[26]。人口压力和利润诱惑之下,作物与家畜的耦合破裂,专门化生产系统迅猛发展^[8]。1960 年,韩国奶牛饲养量不足 1 000 头,1993 年超过 55.3 万头^[27]。21 世纪初,中国、越南和泰国已经生产全球 50% 以上的猪肉和 1/3 的鸡肉^[28]。

Pingali^[24]的体系实际上只有 3 个农业阶段:低水平的专门化生产,综合系统,集约化的专门化生产。驱动力主要是人口压力^[29]。

2.2 非洲

基于联合国食物与农业组织(FAO)和国际家畜研究所的研究,Steinfeld^[30]认为西非农业系统有 4 个发展阶段。

最初,采摘是主要的植物生产方式^[12],渔猎是主要的动物生产方式^[31],共同支撑人类生存^[32]。后来,分化为作物系统(crop system)和放牧系统(grazing system),各自独立演进。

随着生产发展,作物系统和家畜系统营养匮乏,相互之间产生需求。放牧家畜需要作物副产品作补饲料;作物生产需要家畜粪便提高土壤肥力、改善营养循环,需要畜力提升种植能力^[33];2 个生产系统整合为混合系统,系统生产力提高。

由于人口“爆炸”,食物需求猛增,家畜数量飙升^[15]。部分混合系统开始解体,转向专门化的作物生产系统(specialized crop system)和工厂化的家畜生产系统(industrial livestock system)^[2],化石原料高强度投入。专门化系统引发严重的能源与环境危机^[34],如耕地退化^[35,36],不可再生资源过量、低效利用^[37],水源污染,生物多样性丧失^[38],为集约化的作物-家畜综合系统提供了发展机遇。它对科技、经济与社会服务系统要求高,只有发达地区才有能力建设和管理。

2.3 美洲、欧洲与大洋州

土地利用变化是农业系统演化的表现。透过森林覆盖的历史轨迹,把土地利用变化分为 4 个阶段^[39,40]。

1) 荒地阶段(wildland)。人类文明早期,人口少,对土地压力小,多数土地处于原始状态,采摘和渔猎是重要的生产方式^[32,41],已经开始驯化、种植作物^[42~44],很可能是为了饲养家畜^[17]。

2) 先锋开发阶段(frontier clearings)。北美 79% 的草原因人类开垦和城市拓展而消失,高草草原(tall grass prairie)水热条件较好,逐渐开垦殆尽,形成玉米(*Zea mays*)带^[45~47]。巴西圣保罗周围的森林自欧洲人定居至 1980 年代几乎砍完^[48],通过“游耕”或长期休闲维持耕地肥力^[45]。比利时西部的 Ename wood,19 世纪前期人口密度大约 100 人/km²,耕地面积的比例不足 10%;20 世纪末,人口密度增加到 250~340 人/km²,耕地占土地总面积 80% 左右^[49]。1800 年以前,新西兰森林基本覆盖全国,自欧洲人开始定居到 1990 年,森林覆盖率下降到 23%^[50]。

3) 自足(小农场)农业阶段(subsistence and small scale farms)。大多数人从事食物生产,供应自己和当地,属区域性自给自足的小农经济^[51]。但是,国家之间的食物贸易逐渐频繁^[52],引导农场开始根据市场预期调整种植结构^[46,53]。由于过度种植经济作物(cash crop),土壤侵蚀严重,肥力衰竭^[46]。这一时期,各个国家建立了完善的农业科学研究与示范推广体系。

4) 集约化农业阶段(intensive agriculture)。“工业革命”启动了农业工厂化生产,以支持庞大的城市消费,二战后逐渐成为发达国家农业主流模式,30 年前左后向发展中国家转移^[8]。以新的作物和家畜品种为基础^[54~56],作物种植依赖机械、化肥、农药^[57,58],家畜饲养大量使用合成饲料、激素、抗生素等^[28,57],生产力飞速提升。英国小麦(*Triticum aestivum*)单产从 0.5 t/hm² 上升到 2 t/hm² 用了将近 1 000 年,20 世纪不到 40 年产量就飞跃到 6 t/hm²^[56];1940 年以前,科罗拉多州东北部玉米产量不足 2.5 t/hm²,现在超过 10.0 t/hm²^[54]。

专门化农业生产降低系统多样性^[54,59],增加环境风险^[19,60]。巴西喜拉多(Cerrado)曾是世界最大的热带萨

王纳,有 186 万 km²,50 年前几乎是原始状态,目前 70%的土地开垦,主要种植水稻(*Oryza sativa*)和大豆(*Glycine max*)^[48]。1952 年,瑞典农场有马(*Equus caballus*)、奶牛、猪(*Sus domesticus*)、鸡(*Gallus domesticus*)等家畜,有籽实作物、根系作物、纤维作物、饲草作物;1992 年,主要是奶牛和猪、籽实作物和牧草作物,农场线元素(渠、田埂等)和点元素(树岛、草地、湿地)明显减少,作物主产区 and 家畜主产区分隔在全国不同生态区域,生态系统服务功能降低或丧失^[61]。

工厂化家畜生产造成严重的环境污染^[62]。据不完全统计,1988—1998 年,加拿大安大略省西南部报告 229 起粪泄露污染,46 起毒死鱼的事件;2001 年,加拿大全国家畜排泄 1.64 亿 t 粪,排放大量的氨、硫化氢、甲烷等有毒或温室气体^[19,63]。在美国中西部,作物系统是 N₂O 最大的排放源^[64],原因是过量施用 N 肥。而且,专门化家畜系统容易爆发人畜共患传染病,严重威胁人类健康^[65]。

这个体系中,农业系统实际上只有 3 个发展阶段:原始农业、混合农业和专门化农业。当前,为了解决专门化农业系统的环境污染,发达国家土地利用出现“逆转”趋势。一部分农田开始转变为林地或多年生草地^[50,66],欧洲从 1980 年代初重新加强以草地为基础的家畜生产或发展混合农业系统^[67],并倡导建立豆科放牧草地或草田轮作加强草畜耦合以提高整个系统的资源使用效率^[68,69]。

2.4 全球

van Keulen 和 Schiere^[70]以空间替代时间分析认为全球混合农业系统经历了 4 个阶段。

1) 扩张农业(expansion agriculture, EXPAGR)。采集农业与狩猎农业自发耦合,但作物与家畜 2 个系统保持高度独立性,相互作用微弱,通过物物交换发生联系^[29]。家畜提供部分粪肥,作物提供谷物、作物副产品和残留物。

2) 低(外部)投入农业(low external input agriculture, LEIA),作物生产者饲养家畜,家畜生产者经营耕地,2 个系统实现真正意义上的(自觉)耦合^[20]。作物生产借助畜力扩大种植面积,由于缺少外部投入,粮食只能自给自足。动物养殖生产畜产品,也支持作物种植,改善了农场的营养循环和土壤碳平衡,家畜的系统地位提升。这一时期,全球 32%的陆地被开垦^[72],包括 1/4 的天然草地^[40],过去 200 多年世界森林覆盖率降低 20%~50%^[73]。与此相反,1700—1980 年,全球耕地增加 4.66 倍^[54];食物生产系统已经覆盖 1/4 的陆地表面^[73]。作物种植、有作物生产辅助的天然草地放牧是主要生产方式,存在于发展中国家,大约养活世界 50%人口^[74,75]。

3) 高(外部)投入农业(high external input agriculture, HEIA)。最初,土壤肥力通过系统内部高强度营养循环维持,生产力达到一定阈值后,依靠外部投入(化肥、农药、机械等)提高产能。人口压力、利益诱惑,系统趋向于专门化。1991—1993 年,专门化家畜系统生产的肉类占全球总产量的 37%,1996 年上升到 43%^[76],鸡肉已经占全球产量的 50%以上,牛肉超过 10%,蛋类占 2/3^[76]。在发展中国家,这个过程被冠之“绿色革命”和“家畜革命”(livestock revolution)^[36,77],1950 年代末始发于墨西哥,1960 年代后席卷亚洲,世界饥饿人口由 1960 年的 60%下降到 2000 年的 17%^[74]。

但是,高投入导致资源利用效率下降和废弃物增加,加速水土流失^[59],大量有害物质进入食物链^[4,78],生物多样性减少^[79],环境灾难频繁^[80]。目前全球 N 肥用量是 1950 年的 8 倍左右,2030 年预计超过 13.5 倍^[19],但 N 肥利用效率不足 40%^[58];杀虫剂使用量是 1945 年的 40 倍左右,2020 年预计还将增加 75%^[4,80];地球 50%的淡水被开发^[80],抽提的地下水 70%用于灌溉,全球 1/5 的水浇地盐渍化,而且仍以 150 万 hm²/年的速度增加^[71];当前,美国玉米带土壤 C 贮量只有 1907 年的 50%左右^[54]。1970 年代到 1990 年代中期,发展中国家肉和奶消费量的增幅分别高出发达国家 3 和 2 倍^[81];预计 2020 年,发展中国家肉消费量占世界总量的比例将从目前的 52%上升到 63%^[82],全世界的肉需求量将翻一番^[76];必将刺激发展中国家家畜专门化生产,须高度警惕环境灾难。

4) 新保护农业模式(new conservation agriculture mode, NCA)。废弃物作为资源再次利用,作物生产与家畜生产在集约化水平上整合,强化系统营养循环。有机农业(organic farming)为代表性模式之一,起源于 1940 年代,使用免耕、覆盖作物(cover crop)等替代技术管理作物和家畜^[59],以避免或减少使用化肥、除草剂、杀虫剂、激素、抗生素、合成饲料,目前全球有机农产品销售以每年 20%的速度递增^[83]。显然,在这一体系中,作物与家畜的系统耦合是农业演化的方向,食物安全和生态安全是农业系统进步的“平台”,外部投入则是“推进剂”。

2.5 小结

作物与家畜的关系构成农业系统演化的主线。从原始食物收集(Originally hunting and foraging system, OHF),农业系统演化经历 6 个稳定阶段,有 2 次专门化和 3 次整合,整体上沿着生产力提升与农业多样性增加的方向螺旋式上升,有 3 个明显的跃升(图 1)。

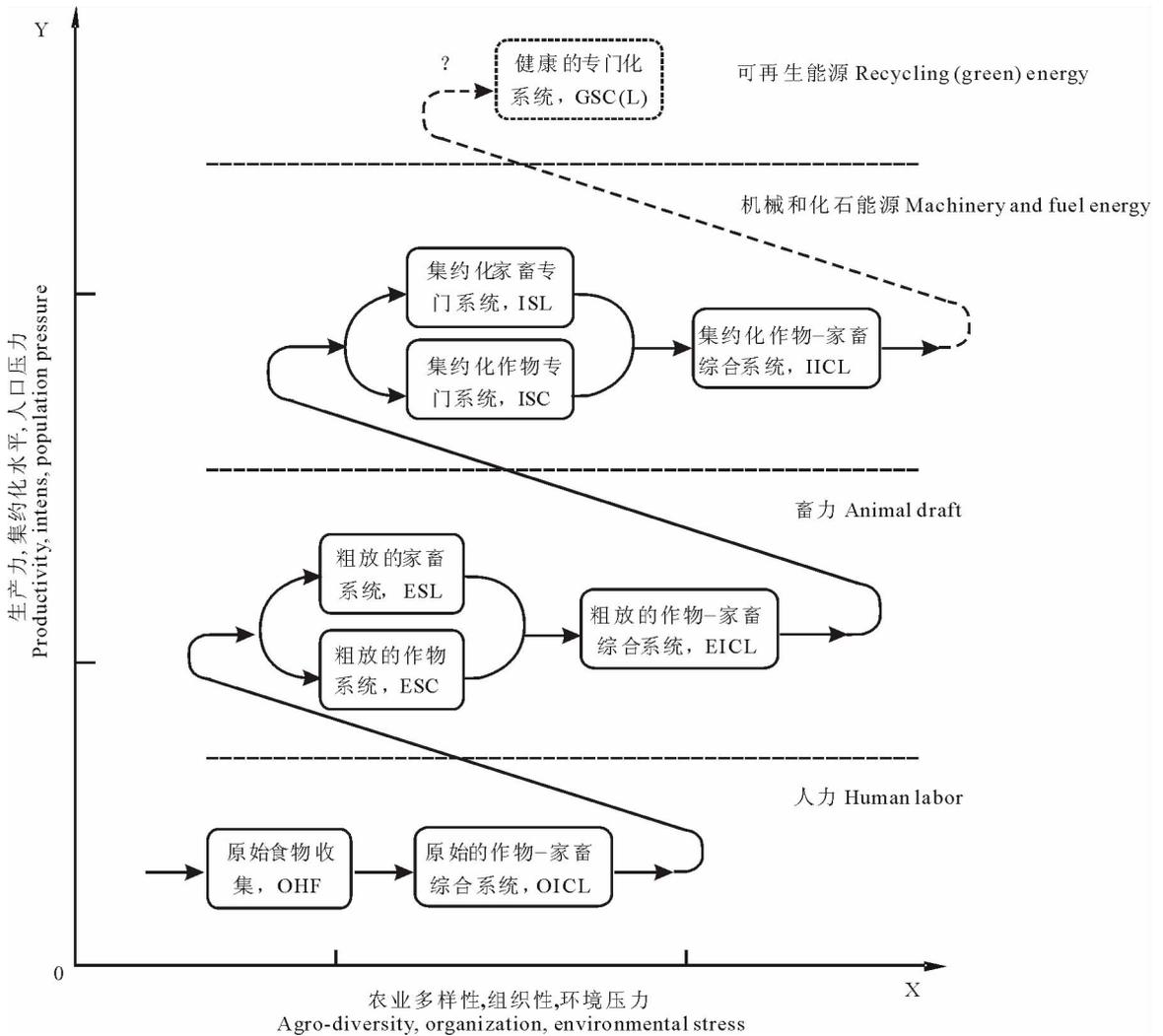


图 1 作物—家畜综合生产系统的演化

Fig. 1 Evolution of integrated crop-livestock production system

OHF:Originally hunting and foraging system;OIICL:Originally integrated crop-livestock production system;ESC:Extensively specialized crop production system;ESL:Extensively specialized livestock production system;EIICL:Extensively integrated crop-livestock production system;ISC: Intensively specialized crop production system;ISL:Intensively specialized livestock production system;IIICL: Intensively integrated crop-livestock production system;GSC(L):Green specialized crop (livestock) production system

1)原始的食物收集系统,从人类起源持续到 1 万多年前,旧石器时代,渔猎与采集主导人类食物“生产”^[32,84]。“找到什么吃什么”(eat whatever is found,EWF),但是开始有意识地蓄养动物、撒播种子。原始的食物“生产”系统,时间以十万年计(表 1)。

2)原始的作物—家畜综合系统(Originally integrated crop-livestock production system,OI),新石器时代,原始社会末期,农业起源后,人类社会加速^[85]。作物与家畜品种逐渐驯化,作物生产供给人畜^[16]，“驯化什么种(养)什么”(raise whatever is domesticated,RWD)。时间以万(千)年计。

3)粗放的专门化生产系统(extensively specialized production system,ES),包括粗放的作物生产系统(ex-

tensively specialized crop production system, ESC)和粗放的家畜生产系统(extensively specialized livestock production system, ESL)。新石器时代末期,第1次社会大分工,家畜生产、作物生产先后从原始农业“剥离”,人类进入金属时代^[85],奴隶社会,依靠畜力,生产力迅速提升,畜牧文化与农耕文化分道发展,粗放的家畜专门化生产主要是游牧。“种(养)什么吃什么”(eat whatever is raised, EWR)。时间以千年计。

4)粗放的作物一家畜综合系统(extensively integrated crop-livestock production systems, EICL),封建社会,生产力依赖于精耕细作,自给自足的小农经济,外部投入少。“吃什么种(养)什么”(raise whatever is edible, RWE)。时间以(千)百年计。

5)集约化的专门生产系统(intensively specialized production system, IS),包括集约化作物生产系统(intensively specialized crop production system, ISC)和集约化家畜生产系统(intensively specialized livestock production system, ISL)。发达国家始于“工业革命”,发展中国家二战后推行。家畜生产逐渐独立出来,依赖城镇附近的交通、贮藏、市场条件,与作物生产一道开展机械化大生产,集约化的家畜生产主要是舍饲肥育。解决温饱,开始“什么挣钱种(养)什么”(raise whatever is profitable, RWP)。时间以百(十)年计。

6)集约化的作物一家畜综合系统(intensively integrated crop-livestock production system, IICL),二战后,可持续发展的思想起源,首先在欧美推行。注重生产与环境双赢,“什么健康吃什么”(eat whatever is healthy, EWH)。时间以十年计。

表 1 作物一家畜综合生产系统的特征

Table 1 Attributes of integrated crop-livestock production system

系统 System	OHF	OICL	ESC	ESL	EICL	ISC	ISL	IICL
动力 Power	人力 Human labor		畜力 Animal draft		机械 Machinery		机械 Machinery	
生产目标 Target	自给不足 Self-unsustainability		自给自足 Self-sustainability		市场 Merchandise		市场与环境 Merchandise and environment	
时间尺度 Time (a)	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ³	10 ^{2~3}	10 ^{1~2}	10 ^{1~2}	10 ¹
经营规模 Farm size (hm ² /farm)		<1	10 ^{0~1}	10 ^{0~1}	10 ^{0~1}	10 ^{1~3}	10 ^{1~3}	10 ^{2~3}
外部投入 External input	No	No	+	+	++	++++	++++	++++
产出 Output		+	++	++	++	++++	++++	++++
风险 Risk	++++ ^a	++++ ^a	++++ ^b	++++ ^b	++++ ^c	++++ ^d	++++ ^d	++++ ^e
生产效率 Productive efficiency	+	+	++	++	++	+++	+++	+++
生态效率 Ecological efficiency	++++		++	++	++++	+	+	+++
农业多样性 Agrodiversity	++	++	++	++	+++	++	++	++++

+ 很低 Very low, ++ 低 Low, +++ 中 Medium, ++++ 高 High. a: 主要是生命威胁,如猛兽、火灾、洪水等 Life risk. b: 主要是管理(如病虫害)、气候和环境风险(如沙漠化、盐渍化) Risk of management, climate and environment. c: 主要是气候风险 Climate risk. d: 主要是气候风险、市场风险与管理风险 Risk of climate, market and management. e: 主要是市场风险 Market risk.

粗放型及其以前的农业系统演化,气候因素和人口压力不可忽视^[84,86,87];集约化系统演化则主要依靠人口压力与科技推动。原始和粗放的农业系统属“自给型”,集约化系统从市场输入生产资料、向市场输出产品。主要因为人口压力和科技推动,加之气候的不确定性^[86,87],专门化过程驱动农业系统生产力上升了3个层次(图1);原始农业依靠人力,粗放农业依靠畜力,集约农业以化石燃料驱动机械(表1)。但是,专门化农业系统常常陷入生态“窘境”:粗放型是荒漠化、地力衰竭等;集约型主要是环境污染(表1)。环境压力之下,作物生产与家畜生产整合为综合系统,以加强农业系统的物质循环。粗放与集约是相对的,工厂化生产只是集约化的形式之一,人口压力的内涵也经历了食物数量、质量和生活质量的变化。农业系统每一次质跃,都是为了满足人类进步的需求。

粗放的综合系统也称“三低”系统(3L系统, 3L system):低投入(low input)、低产出(low output)、低风险(low risk),劳动效率也低;广泛存在于发展中国家,生产水平远不能满足人口高速增长和人民急切致富的需要,正在向集约化的专门生产系统急速推进。集约化的专门生产是“三高”系统(3H系统, 3H system):高投入(high

input)、高产出(high output)、高风险(high risk),劳动力效率也高;畅行于发达国家和地区。3H 系统主要缺陷是:结构简单,线性物流与能流模式,系统弹性小,抵抗力和恢复力低,外界干扰容易阻滞物流和能流;产品单一,收入来源单调,市场风险大;环境污染严重和资源消耗迅速,尤其化石能源消耗。欧美率先发展集约化专门生产系统,在付出了沉重的能源与环境代价后,30 年前开始整合作物与家畜生产,发展集约化的综合农业系统,投入和产出较高、风险较小。

目前,全世界存在从原始到集约化所有类型的农业系统,6 个相对稳定的演化阶段之间,也存在各式各样的过渡类型。一些极端的综合生产系统,如作物生产或家畜生产畸轻或畸重的综合农业系统,普遍存在于人口与资源压力巨大的发展中国家和地区。巨大的社会需求和科学技术推动,农业系统常常在某一阶段短暂过渡,甚至跳跃式地发展到更高级的阶段。农业系统也可能因为特定的历史条件,发生倒退。根据农业系统演化的方向,下一个演化阶段可能是生态与生产双赢的专门化生产系统,生产力更高,环境效益更好,即健康的专门化生产系统(green specialized production system,GS)(图 1),依靠再生能源,既是人类发展的需求,也是科技进步的方向。

3 作物—家畜综合生产系统的类型与分布

农业系统在环境(气候、土地等)、生物(植物、动物等)和社会(管理、科技等)3 类因素的共同作用下发生与发展^[88]。作物与家畜是关键组分,其互动模式是综合系统分异的基础。区域性分布的农业资源,支配着农业系统中植物与动物的成分及其互动机制,加之生产力水平与社会需求的差异,不同农业生态区域形成稳定的综合系统类型(图 2,3),主要有 6 类(图 2)。不同类型的农业系统之间沿着一定的环境、生物与社会经济梯度演替(图 2),水、热是关键。根据草原的综合顺序分类法^[89,90],主要以水、热因素及其相互关系为基础,确定各类系统分布的模式图(图 3)。实质上,各类系统的分布区存在交叉。

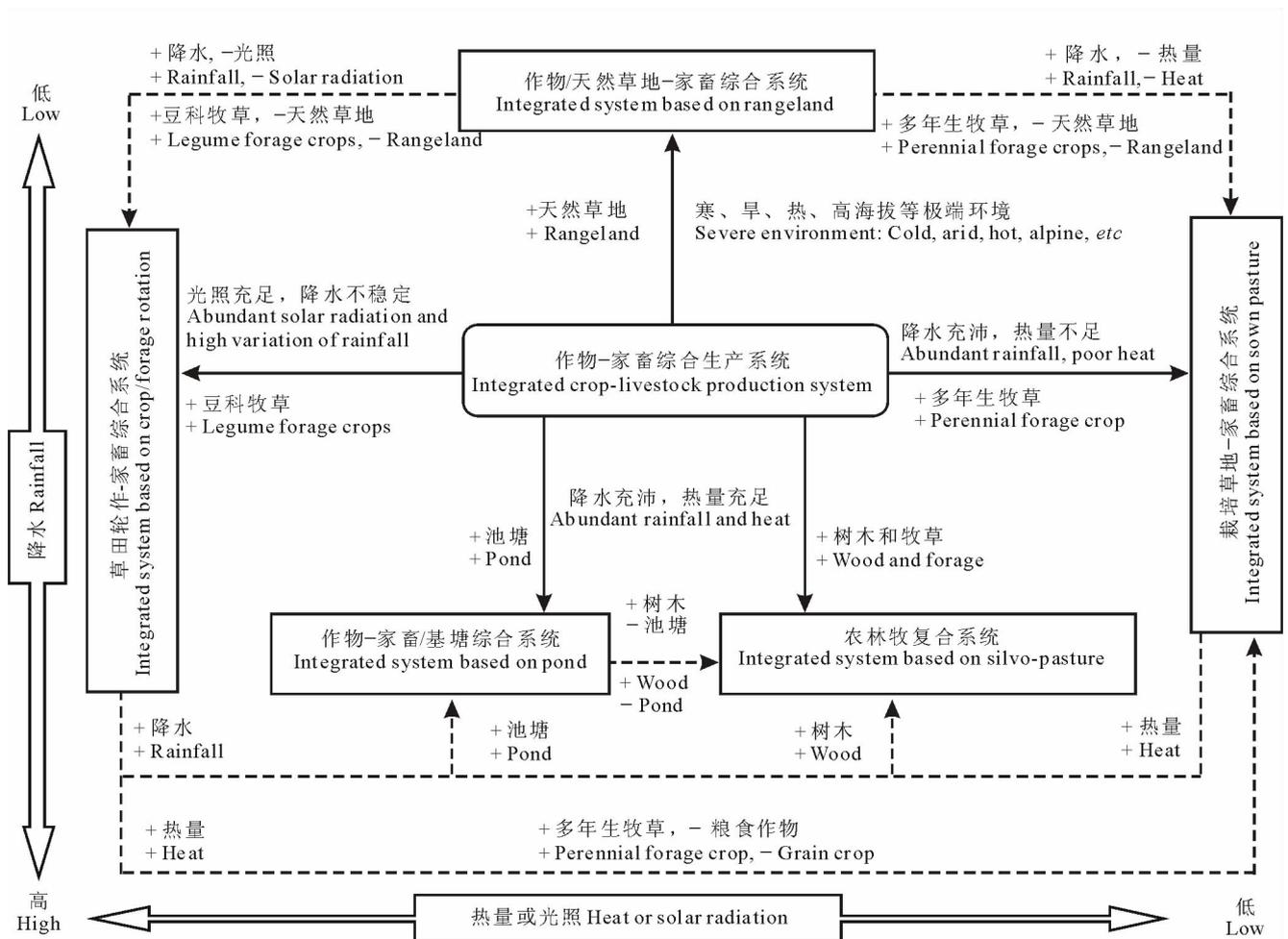


图 2 作物—家畜综合生产系统的演替

Fig. 2 Succession of integrated crop-livestock production system

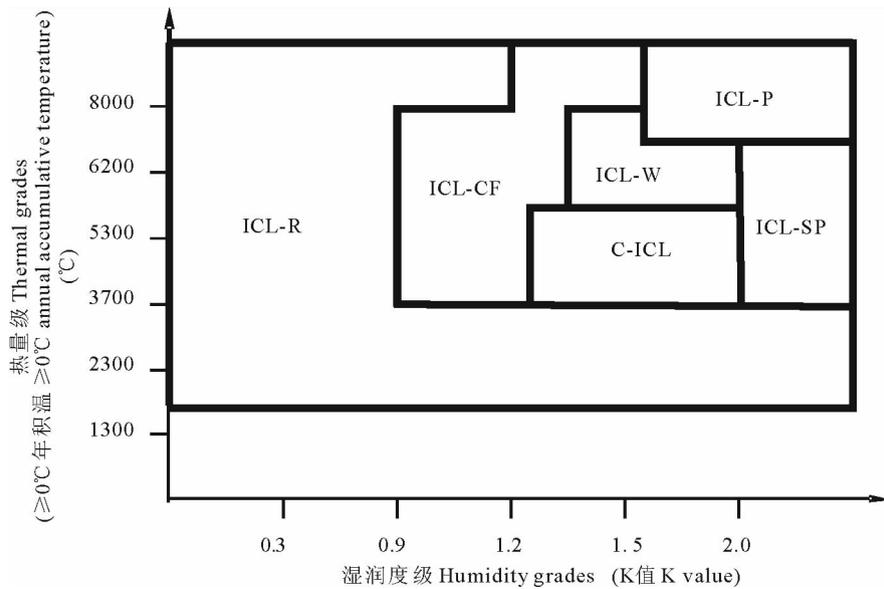


图3 作物一家畜综合生产系统的分布示意图

Fig. 3 Distribution sketch of integrated crop-livestock production systems

$k = \frac{r}{0.1 \sum \theta}$, 式中, r : 年均降水量 Annual mean precipitation (mm), θ : $\geq 0^\circ\text{C}$ 年积温 $\geq 0^\circ\text{C}$ annual accumulative temperature ($^\circ\text{C}$); C-ICL: 传统的作物

一家畜综合生产系统 Classically integrated crop-livestock production system; ICL-R: 作物/天然草地一家畜综合生产系统 Integrated crop-livestock production system based on rangeland; ICL-CF: 草田轮作一家畜综合生产系统 Integrated crop-livestock production system based on crop/forage rotation; ICL-SP: 栽培草地一家畜综合生产系统 Integrated crop-livestock production system based sown pasture; ICL-W: 农林牧复合系统 Integrated crop-livestock production system based on woodland (Agro-silvopastoral system); ICL-P: 作物一家畜/基塘综合生产系统 Integrated crop-livestock production system based on pond

3.1 传统的作物一家畜综合生产系统(classically integrated crop-livestock production system, C-ICL)

这里, 作物不包括牧草作物。存在于温带、亚热带或热带的季风区(图3), 降水和热量相对充沛、水热匹配好, 旱涝等自然灾害少, 地形起伏小、易于田间管理和放牧家畜。作物与家畜互作有3条主要途径, 覆盖作物或作物茬茬提供家畜放牧的机会, 作物副产品饲喂家畜, 家畜为作物生产提供粪肥, 有时提供少部分畜力。放牧之外, 部分谷物用作精料补饲家畜。

传统的作物一家畜综合生产系统主要存在于发展中国家或地区, 且愈来愈少。为了实现收入来源多样化、增加农业多样性, 以应对市场和环境风险, 提高农业资源的利用效率, 农业系统的组分及其配置比例变化^[8,81]。传统的综合系统, 作物生产与家畜生产在农场内耦合(coupling inside farm); 在发达地区, 变型为农场外耦合(coupling outside farms)的松散的综合系统^[8,91], 逐渐演替为作物或家畜专门化生产系统。发展中地区, 传统的综合农业系统因为组分变更发展为其他类型(图2)^[8]。

3.2 作物/天然草地一家畜综合系统(integrated crop-livestock production system based on rangeland, ICL-R)

主要在温带大陆性气候、热带草原气候、热带沙漠气候、苔原气候和高原气候区域, 寒、旱、热等极端气候(图3), 天然草地面积广大, 此类农业系统占地球陆地面积的50%左右^[92]。我国传统牧区较为典型, 作物地虽少, 但为家畜生产提供重要支撑^[93]。干旱区作物生产依靠灌溉, 除绿洲外, 均为以天然草地为基础的综合农业系统。

家畜、作物和天然草地的互作方式: 家畜放牧天然草地、休闲地、作物茬地; 家畜为作物生产提供粪肥和畜力; 作物副产品或饲草作物补饲家畜。水热条件较好的天然草地, 收获干草, 非生长季饲喂家畜。家畜生产畜产品, 还要提供畜力和粪肥, 旱区是山羊、骆驼(*Camelus spp.*)、绵羊, 寒区是牦牛(*Bos grunniens*)和绵羊, 条件稍好则有肉牛(*B. primigenius*), 驴(*Equus asinus*)比较普及。落后地区, 大家畜一般役、肉、粪兼用, 畜产品生产甚至居次要地位; 如驴, 主要提供畜力, 其次是积肥, 平时放养, 作物播种和收获季节补饲精料、频繁使用^[94]。

养分通过家畜在天然草地和作物地之间流动, 以天然草地向作物地的净输出为主, 天然草地成为作物生产的

“肥料工厂”^[95]。途径一,家畜白天在天然草地放牧,夜晚宿营休闲在作物地,营养物质通过家畜排泄物从天然草地转移到农田^[96]。途径二,较为普遍,家畜夜晚归牧于畜圈,农户收集粪肥,施于农田。天然草地/农田的面积比越高,作物地的厩肥施用量越大^[97]。在尼泊尔,3 hm² 天然草地可以维持 1 hm² 耕地的营养需求;在西非,10~40 hm² 的旱季放牧地或 3~10 hm² 的雨季放牧草地可以提供 1 hm² 谷物生产所需的营养物质^[2]。由于营养循环体系完整,30~40 年连续种植作物地力不会衰竭^[98]。天然草地输出的 N、P 可由植物固氮和大气沉降部分补偿^[13,99,100]。

粗放系统多存在于发展中国家,外部投入少,生产力低,依靠低成本获取效益^[95],综合系统生产 1 t 玉米的化石能源消耗只有专门化系统的 1/4^[100]。但是系统的生态效率不低^[9,76],役畜投入到作物生产的能量效率就高于机械^[101]。在我国,主要分布于传统牧区和农牧交错带北部^[8]。

集约化系统存在于天然草地面积广大的发达地区。北美大平原西部(短草草原,short grass prairie),以及落基山脉与海岸山脉之间柏一蒿荒漠,是小麦/天然草地—肉牛生产系统,家畜在天然草地放牧,开垦少部分草地种植冬小麦、黑麦(*Secale cereale*)等,用于调制干草或放牧。水热条件好的地区,灌溉或补播改良天然草地,割草或放牧。外部投入多,机械化程度高,作物生产很少使用畜力。

3.3 草田轮作—家畜综合系统(integrated crop-livestock production system based on crop/forage rotation, ICL-CF)

世界上最普遍的综合系统,粮食作物、经济作物与饲草轮作,或播种失败后种植饲草,家畜介入丰富了作物轮作模式与作物—家畜互作途径。主要分布于季风区(温带、亚热带、热带)、地中海气候区和山地气候区,降水季节和年变率大(图 3)。由于干旱或低温,多数作物生长有明显的季节性,系统在作物非生长季通过牧草—家畜生产维持。作物与豆科牧草轮作,是此类系统的特色,生物固氮维持地力,牧草的营养体生产度过旱季或冷季^[102]。

作物—家畜互作模式:饲草作物和作物残茬地放牧家畜;饲草作物或粮食作物(小谷物)刈割后饲喂家畜,粮食作物或经济作物的副产品、残余物饲喂家畜或调制干草;粮食作物在收获失败(遭遇旱涝、病虫等灾害)或畜产品价格好的年景放牧家畜;家畜为作物生产提供畜力和厩肥^[8]。自然条件较为优越,家畜主要是肉牛、绵羊和奶牛,丘陵地区主要是山羊。北方以小麦、南方以水稻为主,普遍种植玉米。系统多样性较高,收入来源多,抵御气候和市场风险的能力强。

发展中国家是粗放型,家畜生产是轮作体系的附庸,少有专为家畜种植的作物,家畜粪肥运送到耕地,作物生产只有种子、化肥等必需的外部投入,大家畜为系统提供畜力。我国西南岩溶地区,热量和水分充裕,光照不足,利用冬闲田种植牧草;黄土高原在夏季作物收获后或因为春旱不能播种其他作物,利用其余季节的热量和降水生产饲草。

发达国家是集约化系统,技术密集型。北美大平原中东部地带性植被是草原,19 世纪大规模开垦后,黑风暴肆虐,粮食生产停滞不前,引入饲草作物和家畜后,环境明显改善,作物生产稳定^[103];高草草原年降水量 750 mm 以上,是玉米带,有玉米—大豆—冬小麦、玉米—大豆—春大麦(*Hordeum vulgare*)、玉米—大豆—高粱(*Sorghum bicolor*)、玉米—鸭茅(*Dactylis glomerata*)等轮作模式,玉米或高粱收获后作家畜饲料,饲草作物或小谷物放牧家畜^[63],家畜主要是奶牛和肉牛;混合草原(mixed grass prairie)年均降水 375~525 mm,是传统小麦带,有小麦—高粱—休闲、春小麦—玉米—大豆、大麦—冬小麦—玉米、棉花(*Gossypium hirsutum*)—冬小麦—休闲—黑麦等轮作模式^[104],小谷物常放牧肉牛,也调制干草。澳大利亚年均降水 250~600 mm 区域也是世界著名的小麦带^[105,106],1940 年代以前,谷物连作或谷物/休闲制,土壤有机质下降,产量上不去;二战后引入白三叶(*Trifolium repens*)和苜蓿(*Medicago sativa*),草田轮作,生物固氮,草畜结合,系统产出大幅提升^[107],轮作模式有小麦(或大麦)—地三叶(*T. subterraneum*)(或苜蓿)、苜蓿—大麦—苜蓿—小麦—休闲等,家畜主要是肉牛和绵羊。近年来,此类系统配置适当比例的多年生禾草单播或禾/豆混播草地作为永久放牧地。

3.4 栽培草地—家畜综合系统(integrated crop-livestock production system based sown pasture, ICL-SP)

世界上以放牧为主的综合系统,集约化生产,主要分布在温带海洋性和山地气候区(图 3)。降水充沛,热量尚可,但光照不足,不利于籽实生产;兼或地形复杂,耕作不便。历史时期,林地开垦后,种植牧草。

作物与家畜的互作模式:家畜在多年生栽培草地上轮牧;栽培草地轮流放牧和刈割,或种植一些高产牧草,割草后青贮,少部分晾晒干草,冷季补饲家畜;热量条件稍好、人口密度高的地区,种草,零放牧;家畜粪便放牧期间直接返还作物地,作物生产依赖化肥和机械,基本不用畜力。家畜以奶牛、肉牛和绵羊为主;奶牛主要生产牛奶和奶酪;绵羊生产以羊羔肉为主,也产毛。多年生饲草主要是黑麦草、白三叶和红三叶(*T. pratense*),放牧为主;一年生牧草主要是玉米和燕麦(*Avena sativa*),多作青贮。

此类系统普遍存在于发达国家,欧洲西北部和新西兰最为典型,亚洲主要是日本和韩国。新西兰最具代表性,放牧系统的产出/投入比高,依靠较低投入和较高产出获得效益;全国有栽培草地 940 万 hm^2 ,主要是黑麦草或白三叶/黑麦草草地^[108],常年划区轮牧^[50];养羊近 5 000 万只,牛近 500 万头,65%为奶牛,鹿 120 万头;生产力虽只有专门化家畜系统的 1/2~2/3,但投入少,质量上乘,肉、奶等畜产品在国际市场少有竞争对手。英国 60%以上耕地是永久放牧地,多年生黑麦草单播或与白三叶混播,主要放牧奶牛、肉牛和绵羊;多年生黑麦草、白三叶、红三叶青贮,以及小麦、燕麦、大麦秸秆调制干草,冷季补饲。法国 60%的栽培草地放牧,豆科牧草以三叶草为主,禾草主要有多年生黑麦草(*Lolium perenne*)和羊茅(*Festuca ovina*)^[109],牛羊比约为 2。荷兰 70%的栽培草地放牧奶牛。日本 12%左右的栽培草地为玉米、高粱、燕麦等一年生牧草,收获后饲喂家畜^[110];60%为混播草地放牧利用,豆科主要是白三叶,禾草以多花黑麦草(*L. multiflorum*)、鸭茅和猫尾草(*Phleum pratense*)为主;肉牛/奶牛比约 1.5。加拿大的栽培草地,20%为苜蓿,其余是无芒雀麦(*Bromus inermis*)、鸭茅等,50%以上放牧利用,兼有割草,家畜主要是奶牛和肉牛。发展中国家,巴西、阿根廷和南非有分布,其他地区也在试验、推广。我国云贵高原,绵羊、山羊或奶牛轮牧栽培草地,生产与生态效益优异^[111,112]。

3.5 农林牧系统(integrated crop-livestock production system based on woodland, agro-silvopastoral system, ICL-W)

这里“农”的涵义是作物生产。热带雨林气候区、热带季风气候区、温带季风气候区、亚寒带针叶林气候区或山地气候区(图 3),乔木(含果树)、作物和家畜相互作用形成农林综合系统(agroforestry)^[113],发展中国家主要分布在丘陵地带。地形复杂区域,家畜直接放牧林下草本层;地势平缓区域,种树,林间种植粮食或经济作物。乔木产出木材、果树等产品前,系统效益主要来自家畜和作物。干旱地区,绿洲种植防风林,冷季放牧林下草本或落叶。

作物与家畜互作途径:林间饲草作物或其他作物茬供家畜放牧;树木为作物和家畜提供遮荫、避雨条件;林间饲草作物、作物茬收获后调制干草或青贮,补饲家畜;家畜排泄物还田,大家畜提供畜力。管理原则:林木种植 6 年以上^[114],一般 8~9 年后^[115],开始放牧利用;果树生长期间,林下牧草刈割利用,非生长季可放牧;多年生饲草作物播种后 1~2 年内不放牧^[116],适度刈割,直到草地稳定。

发达国家多为技术和能量集约型的农林牧综合系统。种植树木和作物,或在天然林下种植经济作物,发展作物、木材和家畜生产;有时在林下播种牧草,但作为乡土种,主要发挥水土保持功能,适度开展家畜和木材生产。美国东南部 112 万 km^2 土地,55%为林地,收获木材前,家畜放牧是主要生产方式^[116]。林间饲草作物有百喜草(*Paspalum notatum*)、毛花雀稗(*Paspalum dilatatum*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、地三叶、黑麦草等,也播种大豆、玉米等,但以耐荫湿、耐牧的多年生牧草为主。家畜主要有牛、鹿、野牛(*Bos gaurus*)、绵羊、山羊、马、火鸡(*Meleagris gallopavo*)、鸡等,一些作为狩猎或观赏动物,牛的放牧密度达到 0.7 头/ hm^2 ;林木速生、深根、耐旱。加拿大不列颠哥伦比亚省南部,近 70%的放牧系统是农林牧综合系统^[117],林间播种鸭茅和杂三叶(*Trifolium hybridum*),每年随家畜输出的 N 量低于 2.4 kg/hm^2 ,由生物固 N 补充^[118]。

发展中国家多在林区放牧,利用木本幼嫩枝叶、林中天然牧草和落叶,林下很少种草或其他作物,生产木材和畜产品,另外开垦林地种植作物。在农户尺度上,作物生产与木材、家畜空间上隔离,但通过放牧或补饲耦合。不丹 74%的国土覆盖天然林,阔叶林、针叶林和灌丛分别占 52%,35%和 11%,林地放牧历史悠久^[119];家畜也经常放牧作物茬地^[2],或利用作物残余物,为作物生产提供畜力;90%的农户养牛,温带和亚热带地区养肉牛,高寒地区养牦牛,1996 年畜牧业生产占农业 GDP 的 21%^[119]。我国南方丘陵山区,林地开垦后种植作物,家畜放牧天然林地和作物茬地,秸秆补饲^[8]。发达国家暗针叶林区放牧绵羊或驯鹿(*Rangifer tarandus*),没有种植业,是林

牧综合系统(silvopastoral system)。

3.6 作物—家畜/基塘综合系统(integrated crop-livestock production system based on pond, ICL-P)

起源并分布于降水丰富的热带雨林气候区和亚热带季风气候区(图 3),常位于江河的三角洲上。作物以水稻、甘蔗(*Saccharum officinarum*)等为主,基塘通过营养物质循环融入作物—家畜系统。

作物—家畜互作模式:作物副产品和残余物饲养家畜,或与单胃畜粪一起,作为鱼的饲料;基塘淤泥,或与家畜粪便,是作物生产的肥料;大家畜常常为作物生产提供畜力。以单胃家畜猪、禽为主,反刍家畜主要是水牛(*Bubalus bubalis*)和山羊,但居次要地位。作物有水稻、木薯(*Manihot esculenta*)、玉米、花生(*Arachis hypogaea*)、甘薯(*Ipomoea batatas*)、甜菜(*Beta vulgaris*)等^[120]。农业多样性高,有水生畜禽,网状互作,系统成分和景观显著区别于其他系统。

印度泰米尔纳德邦,综合系统类型有水稻—山羊(猪、水牛、鸡)—鱼、水稻—山羊/水牛(猪)—鱼—树木、水稻—鱼—蔬菜—树木^[121~123],土地 60%~80% 种植作物,20% 左右种蔬菜,5%~20% 开挖基塘养鱼,其余种植树篱^[122]。猪/鸭—鱼—蔬菜系统广泛分布于中国南方、越南和柬埔寨^[124]。作物—家畜(禽)—鱼之间构成营养网^[122]。该系统分布于世界人口与家畜密度最高的区域^[62],地处热带、亚热带,排泄物易分解,通过沼气池可以转化为能源和鱼的饲料,保持物流与能流通畅,而不至于拥堵滞留于生产者与分解者之间,污染环境,所以沼气池在系统中具有重要地位^[88,120]。因为物质循环经过水体,成为基塘子系统的投入,管理不当则污染水体。

我国南方沿海塘基系统有 600 多年的发展历史^[125]。1980 年代,该系统研究曾是我国生态学与科研亮点之一^[126],后来随着农业经济转型,逐渐没落。发达国家较少分布于该气候区,而且专心致志发展草食家畜,塘基系统没有充分发展。

3.7 小结

热量允许,水资源充分保证的区域,农业生产所面临的自然风险较小,专门化的作物与动物生产系统分布广泛。作物—家畜互作能够化解农业生产的自然与市场风险,在农业气候资源贫乏(如降水较少)或配制不平衡(如降水季节变化与年变率较大)的区域,综合农业系统得到发展。

集约化系统主要分布在发达国家,表现为资金和技术的密集投入,而非成本较高的劳动力。发达国家也残留一些原始或粗放的农业系统,如美国一些印地安人部落的渔猎与采集,仅为旅游服务^[32]。发展中国家多是粗放的农业系统,劳动力密集型,多为以自给自足为前提的较为初级的商品生产。发展中国家也有集约化系统,如巴西、阿根廷养牛业、中国南方的养猪业和养鸡业等,一些欠发达国家,正在从劳动力密集型向资金和技术密集型的过渡。发达国家的农业系统与发展中国家有一些区别(表 2)。1) 系统结构。发达国家的综合系统,作物与家畜品种在国家尺度上相对丰富,但是在农场尺度贫乏;美国 2/3 的农场只生产 1~2 种农产品^[127]。由于土地集约化经营(围栏圈地,高强度施用化肥、农药,田间活动频繁等),大型野生哺乳动物减少,鸟类和啮齿类增多。发展中国家,作物与家畜品种在国家和农户尺度上都很丰富,但农业生物多样性过高,分散了有限的农业资源;野生动植物资源丰富,生物多样性高。2) 作物与家畜互作模式。发达国家作物地放牧较为普遍,家畜补饲料主要来自饲草作物,作物机械化种植。发展中国家,家畜主要放牧天然草地、作物茬地和地角边地,作物副产品和残余物补饲家畜^[128];53% 的耕地依靠家畜耕种,50% 的农肥来自家畜排泄物^[129]。3) 外部投入与生产力水平。发达国家是资本、能量、技术集约型,高产出获取收益。发展中国家是劳动力密集型,低投入赢得效益。4) 生产目的。发达国家商品化生产,追求经济效益最大化,正在向生态与经济双赢转变。发展中国家以自我维持为基础。

总体上,综合系统在 2 个方向演化:纵向演化,即演化的时间序列;横向演化,即演化的空间序列(分布)。演化表现出明显的时空趋同与趋异特征。趋异性:1) 空间趋异性,气候、作物、家畜等农业资源配置以及管理方式的空间差异,作物—家畜互作形成具有区域特色的适应性系统(图 2),环境因素起关键作用;2) 时间趋异性,系统目标、发展阶段和管理水平的差异,同一区域内的系统,虽然家畜与作物组分相同,但互作模式差异很大,甚至是不同的系统发展阶段(图 1),社会因素起关键作用。趋异性是农业多样性的根源之一。趋同性:1) 空间趋同性,不同地域之间的农业系统,由于社会发展阶段和管理水平相近,形成相似的生产需求和作物—家畜互作机制,社会因素是关键;2) 时间趋同性,同一区域内,虽然农业系统中家畜与作物组分不同,但是由于农业资源、生产目标和管理手段相似,家畜与作物互做模式相同,综合系统也表现为相近的发展阶段,人类社会因素起关键作用。

表 2 发展中国家和发达国家综合农业系统比较

Table 2 Comparison of integrated crop-livestock production system between developing countries and developed countries

类型 Type	发展中国家,粗放型 Developing countries, extensive type	发达国家,集约型 Developed countries, intensive type
作物或家畜品种 Crop varieties and livestock breeds	农场尺度和国家尺度均丰富 Abundant at scale of farm and national	农场尺度贫乏,国家尺度丰富 Poor in farm, but abundant in whole nation
作物一家畜互作模式 Crop-livestock interaction	复杂:家畜放牧作物残茬或休闲地,或者补饲作物副产品,家畜为作物生产提供畜力和粪肥 Multi-ways: Grazing, range-land, crop stubble or fallow cropland, feeding with crop by-production and residues, draft power and manure for crop	单调:家畜放牧或补饲饲草作物 Simple pattern: Grazing and feed forage crop
作物/天然草地一家畜综合系统 System based on rangeland	天然草地/作物地面积比高,饲草作物面积小,草地连续放牧 High area ratio of rangeland to cropland, small area of forage crop, continuous grazing in rangeland	饲草作物面积大,轮牧 Large area of forage crop for supplemental feed, rotational grazing in pasture
草田轮作一家畜综合生产系统 System based on crop/pasture rotation	农田休闲或播种失败后种草,饲草作物收割后饲喂家畜 Planting forage crops in fallow cropland or after failing to sow grain crop or cash crop, cutting forage for livestock	草田轮作,饲草作物供家畜轮牧 General crop/pasture rotation, a large area of forage crops for rotational grazing
栽培草地一家畜综合生产系统 System based on pasture	很少分布 Poor areas	优势生产系统 Eco-regional dominant system
农林牧复合系统 System based on agro-silvopastoral	天然林,林下很少有作物 Not cropping in forest, only grazing	林下常种植作物 Cropping and grazing in forest
基塘一作物一家畜综合系统 System based on ponds	热带、亚热带地区盛行 Prevailing in tropical and subtropical area	没有发展 No sufficient development
投入 Input	劳动力密集型,技术与资本含量低 Intensive input of labor, poor technology and capital	技术与资本密集型,劳动力投入低 Intensive input of capital and technology, low labor input
产出 Output	低 Low	高 High
目的 Goal	自给自足为前提 Based on self-sustain	以市场为导向,商品化生产 Merchandise production based on market demand

4 作物一家畜综合生产系统的功能

作物一家畜综合系统是组分多样化的农业系统。作物有粮食作物、经济作物、饲草作物等,家畜组分有反刍动物,也有单胃动物,还有家禽,甚至食肉动物,但以食草动物为主。作物与家畜互作是综合农业系统发生与发展的核心机制,持续地丰富和加强系统的生产与生态功能。

4.1 土壤效应

作物一家畜互作对土壤的作用存在 2 种迥然不同的结果。

1) 有益,家畜粪便肥沃土壤。作物一家畜互作维护土壤生物多样性,减少土壤侵蚀,通过调控土-草-畜营养循环,维持土壤肥力^[2]。家畜进入作物系统,增加土壤有机质,提高通透性,促进根系生长^[130]。美国得克萨斯州放牧管理的棉花/小谷物轮作系统,与棉花连作相比,土壤有机 C、微生物 C 和酶活性上升,原生动物和真菌增加,土壤可持续性提高^[131,132]。美国北卡罗莱纳州的综合系统土壤微生物 C/N 高于传统谷物系统和有机农业系统,土壤微生物活性高于传统谷物系统、免耕谷物系统、有机农业系统、撂荒地和林地^[133,134]。美国东南部,草田轮作一家畜综合系统引入深根系的多年生禾草,降低了土壤 N 淋溶损失,增加了蚯蚓数量,改善了土壤透性^[135]。美国东北部,综合系统中作物残茬的多样性与家畜粪便中 P 含量高度相关,增加土壤 N 量和矿质化速率^[136];作物一家畜综合系统中豆科牧草和禾草饲喂家畜、家畜粪便返田,15 年中,土壤有机碳和 N 的含量、及其增量均高

于使用豆科绿肥或化肥的专门化作物生产系统^[137,138],至少不降低^[139]。西非作物生长季,家畜在耕地宿营 1~3 个晚上,排出的尿 N 对此后 3 年的谷子有增产作用^[140]。作物生产和家畜生产隔离将降低耕地质量^[127,141],增施化肥则加重土壤污染^[28,142],导致整个流域严重污染^[8]。

2) 无益或不利。巴西南部免耕 12 年的谷物生产系统,牛冬季进入小麦地放牧,3 年后对土壤密度和孔隙度无显著影响^[143]。一般农林牧综合系统的土壤水分较高,家畜践踏会引起土壤紧实^[117];其他系统,土壤湿度较大时放牧,也破坏土壤^[13]。

4.2 作物效应

在综合系统中,粮食作物、饲草作物、经济作物、树木等通过家畜而组合,农业生物多样性、作物残留物多样性、经营管理方式多样性等农业多样性增加^[5],作物残留物和副产品利用率提高^[2],作物生产增产增效。美国得克萨斯州西部,棉花/小麦/休闲/黑麦轮作,小麦和黑麦为冬季覆盖作物,放牧肉牛,黑麦干草产量和棉花产量分别增加 33% 和 29%^[144]。美国密执根州中部,综合系统生物多样性与玉米产量正相关,作物根的存活时间延长^[136]。北美大平原,在专门化作物系统中,春小麦收获籽实不创造效益,而在禾本科/豆科轮作一家畜综合系统中经济效益显著^[11]。

综合系统常常有覆盖作物,除了作为饲料、联系家畜生产之外^[143],还通过以下途径促进作物生长:保持水土,阻止肥力流失;豆科牧草生物固 N,培肥地力;小谷物或生长速度快的豆科牧草,对杂草有竞争优势^[145];小谷物分泌的他感物质抑制杂草^[146]。美国阿拉巴马州连续 110 年的棉花/豆科作物轮作系统,豆科牧草作为冬季覆盖作物,对棉花的增产作用等效于氮肥^[147]。热带、亚热带或暖温带地区,主要作物生长间隙播种一年生小谷物或豆科牧草,作为覆盖作物,保护农田免受风水侵蚀,抑制杂草生长^[127],为下茬作物生长提供肥力^[137],通过土一草一畜互作,提升整个系统的生产水平^[129,148]。

家畜放牧通过抑制毒害草、降低作物蒸腾、促进作物分蘖、灭除病虫害实现作物生产增产增收。美国得克萨斯州的综合系统,蓝茎冰草(*Bothriochloa bladhii*)栽培草地若每年刈割 1 次,杂草盖度达到 40%,而适度放牧地杂草盖度不到 2%^[143]。澳大利亚东南部,小麦营养生长晚期或生殖生长早期放牧绵羊,放牧率 25 只羊/hm²,旱季放牧 20 d,小麦大幅增产,原因是土壤水分增加,作物灌浆期水分利用效率提高^[149]。家畜放牧切断毒害草和病虫害的生活史^[13],破坏害虫的生境^[150],减少除草剂和杀虫剂用量^[138,151],是农田毒害草与病虫害的生态防治手段^[14,149],帮助作物增产增收。

农林牧综合系统中,放牧抑制林下草本植物竞争资源,改善林地营养循环,促进林木更新^[117](栽种的乔木可以看作木本作物^[22])。苏格兰东北部,欧洲落叶松(*Larix eurolepis*)下播种多年生黑麦草,第 6~9 年放牧绵羊,幼树成材率达到 88%~99%^[115]。

4.3 家畜效应

综合系统中,家畜生产通过促进作物生产,改善饲草供给,提高自身生产水平。在印度,种植金合欢(*Acacia tortilis*)和亚尼安苏木(*Hardwickia binata*),小牛秋季放牧林下草地,日增重可达 67~83 g^[129]。

家畜生产是综合系统的稳定阀。畜产品可全年生产,受气候影响比作物生产小;家畜产品可以在需要时进入市场,比籽实生产灵活;畜产品便于加工、贮运;因此,当综合系统面对自然与市场风险时,家畜生产比作物生产稳定,能减少整个系统损失。所以,家畜生产对于发展中国家脆弱的农业系统和农户脱贫有特殊意义。东南亚 6.0%~11.3% 的农场是作物一家畜综合系统,农户 60% 的收入来自动物^[128];1992 年,印度尼西亚和菲律宾的家畜生产分别占 GDP 的 2.1% 和 2.5%^[152](笔者注,家畜生产高度发达的英国整个农业 GDP 占不到全国的 1%)。在 1974/1975 和 1982/1983 两次全球食物危机中,谷物供应虽大幅度减少,但动物生产部分缓解了食物短缺^[129]。

反刍家畜能够利用作物残留物和副产品,生产肉、奶等畜产品,很少与人竞争食物资源^[12],有助于构建综合系统的弹性和可持续性^[132],系统地位更为重要。全世界反刍家畜消耗 37% 的饲料,提供了 61% 的食物能量;家禽和猪等消耗了 59% 的饲料,只生产了 39% 的食物能量。据估测,美国作物残留物和副产品如果通过反刍动物

转化,能够生产 45 亿 kg 牛肉,7.5 亿 t 牛奶^[153]。

4.4 物质循环效应

综合系统内部作物与家畜之间物流通畅,放牧管理尤其如此,牧草吸收的营养有 70%~90% 通过家畜排泄返还土壤。一定范围内,营养物质再循环与放牧强度正相关^[154]。牧草刈割后饲喂家畜,则加速营养物质枯竭。澳大利亚新南威尔士州 1920—1990 年的试验表明^[141],红三叶草田轮作系统,刈割替代放牧,后茬作物减产。与此相反,专门化作物生产系统的营养物质随作物产品输出系统将导致资源枯竭;专门化家畜生产系统的营养物质载体—粪便输出无门,拥堵于系统内,物质循环阻滞,而且导致环境污染。美国得克萨斯州的高羊茅(*F. arundinacea*)—肉牛综合系统,牧草刈割后出售干草,系统 P、K、S、Ca 和 Mg 的流失速率分别是收获畜产品的 11.6、236.8、36.8、6.0 和 101.8 倍^[13]。

农业生产始于 C(CO₂) 固定,止于 C(有机 C) 输出,作物—家畜综合生产系统的 C 循环模式与家畜管理密切相关。在多年生黑麦草—绵羊系统中^[155],放牧率 24 和 47 羊/hm² 的草地固 C 速率分别为 300 和 209 kg/(hm²·d),牧草自我维持耗 C 分别占 45.3% 和 48.8%,进入分解者的 C 分别占 42.0% 和 25.8%,绵羊收获的 C 分别占 12.7% 和 25.4%;然而,高放牧率系统输出的畜产品 C 比低放牧率系统高 39.4%,通过分解者返还的 C 减少 67.1%;显然,输出多而输入少是系统 C 库衰竭的根本原因。系统 N 循环有相似模式。作物与家畜互作有利于农业系统碳平衡。然而,家畜生产排放的温室气体(greenhouse gas, GHG) 约占全球 GHG 排放总量的 18%,包括 9% 的 CO₂、37% 的 CH₄ 和 65% 的 N₂O 等^[156,157]。因此,从牧草、饲料、家畜和草畜关系等各个环节改进草—畜耦合机制,提高系统生产力和畜产品品质,同时减少 GHG 排放,是国际上作物—家畜综合系统研究的难点、热点和前沿^[28,58,158],尤其在欧美等发达国家。

4.5 能量平衡特征

作物—家畜综合生产系统相对于专门化系统具有较高的能量效率。Entz^[91] 在北美大平原北部 12 年试验表明,与谷物专门化系统相比,综合农业系统的能量产出变化不显著,但因为能量投入减少,能量使用效率高 50% 左右。德国南部的奶牛专门化生产系统饲料的能量投入高于放牧系统 2.2 倍,牛奶生产的能量效率低 55.6%^[159]。1975—2000 年,土耳其农业系统的能量效率呈下降趋势^[160],显然与专门化生产系统高速发展有密切关系。

不同类型的综合系统,能量平衡特征各异。意大利东北部的农业系统,化石能源的使用效率依次为:2 年草田轮作系统>5 年草田轮作系统>粗放的多年生草地>4 年草田轮作系统,其中,2 年轮作系统和多年生草地的能量效率分别与肥料和机械能投入关系最密切^[161]。印度西北部不同海拔的自然村,家畜粪肥占作物生产能量总投入的 77%~90%,传统作物的能量产投比为 0.6~6.1,高于经济作物的 0.9(马铃薯)~2.8(豌豆)^[162]。

我国学者较早认识到能量平衡分析对于生态系统研究的重要价值,主要利用统计分析区域性综合系统的能量特征^[148,163],或通过访问调查分析农户系统的能流格局^[164,165],尤其对于西北内陆山地—绿洲—荒漠复合系统,在大空间尺度上分析耦合系统的能量平衡,是目前我国此类研究的特色之一^[148]。综合农业系统家畜生产的能量计算困难,研究相对集中于作物生产。

4.6 经济效益

作物—家畜互作能够提高农业系统的经济效益。美国东南部,作物—家畜综合系统的经济效益显著高于棉花/花生轮作的专门化系统^[135]。澳大利亚东南部,作物—家畜综合系统中绵羊和小麦籽实的收入综合超过小麦专门化生产^[149]。在印度,基塘—作物—家畜综合系统净收入比单纯种植水稻高 23%^[123]。

作物—家畜综合生产系统经济效益好的原因。一是生产风险低;综合系统收入来源多样化,一定程度上规避了专门化生产的市场风险^[29,166];综合系统组分多,可以根据市场需求,灵活地调整产品输出种类、数量和时间,系统收益随时满足临时性投资的需求。二是作物—家畜互作增加了农业系统的弹性,尤其是放牧管理,减少了系统对不可更新资源和能量的依赖^[132],系统应对自然与社会风险的能力增强。三是综合系统提供了农户从事多种

生产的机会;在塞内加尔、尼日尔、布基纳法索和冈比亚 4 个西非国家,农户非农业收入与作物收入负相关($P < 0.01$),却与家畜收入在一定范围内正相关($P < 0.01$)^[167]。

5 国内外对于作物—家畜综合生产系统认识的比较

5.1 对系统内涵的认识

共同之处在于:

1) 多组分耦合系统。农业多样性较高,至少是作物生产与家畜生产相耦合的系统。

2) 多功能系统。至少具有生产和生态 2 种功能。

3) 多途径耦合系统。作物与家畜互作途径多样,在空间上分为两类:作物生产与家畜生产同时发生在同一个农场系统中,即农场内耦合;或在一定空间范围内,农场分工开展作物生产和家畜生产,然后协作,即农场外耦合,典型代表为全球内陆干旱区的山地—绿洲—荒漠耦合系统^[20]。

4) 可控的资源循环系统。不同组分构成系统的营养级,形成完整的物质循环与能量流动通路,一个组分的产出常常是另一个组分的输入,资源利用水平可以人为调控。

5) 可持续的生态农业系统。集约化的作物—家畜综合生产系统是当前世界生产水平最高和生态效益最好的农业系统,成为各国农业结构调整的趋向。

分歧在于,国外学者对于系统中动植物生产的比例有较为明确的划分,发达国家尤其注重系统的多功能性,特别是生态功能。我国学者对综合系统的界定较为定性,强调作物与家畜的空间关系,更关注生产力,符合我国作为发展中国家的需求。

5.2 对系统演化的认识

国内外学者均认同从原始的食物收集系统开始,以集约化的综合农业系统为当前的最新阶段,作物生产与动物生产有 2 次专门化和 3 次整合。

虽然一致认为,在人口与环境双重压力之下,作物生产与家畜生产的耦合将增强,集约化程度将增加^[168,169]。但是,具体向哪个方向发展,各国学者有很大分歧。我国很多学者建议走专门化生产的道路;一些学者认为应该因地制宜,既搞专门化生产,也搞综合农业系统,而且可以跨越式发展^[169,170]。发达国家多数学者倾向于发展综合农业系统,解决专门化生产系统造成能源浪费和污染严重的问题^[54]。为此,美国威斯康星国立大学 1989 年成立了作物—家畜综合农业系统中心;近年来,美国作物学会(CSSA)、农学会(ASA)与土壤学会(SSSA)的联合年会连续设有作物—家畜综合农业系统专题,农学杂志(Agronomy Journal)辟有综合农业系统专栏。

发展中国家与发达国家对于农业系统发展目标的分歧,原因在于各国所处的历史发展阶段及其面临的社会、经济、生态问题不同,农业系统变革就是为了解决这些问题。发达国家的农业生产水平早已解决温饱,所以多强调环境的可持续性。绝大多数发展中国家首先要解决吃饭问题,然后是可持续性发展,因此将会出现从粗放到集约化的各类综合与专门化系统长期共存的局面。

5.3 对系统结构与功能的研究

能量与物质平衡分析是理解系统结构与功能的基础,是明确系统生态效率和可持续性的重要手段。国内外的研究具有共同特点。1) 研究对象,绝大多数集中于作物生产系统,忽视家畜系统,并非严格意义上的作物—家畜综合系统研究;2) 研究尺度,多数研究在国家或区域尺度开展^[159-161,164,165,171,172],有少量农户系统的研究,但缺乏村、乡一级的小尺度研究,制约了成果的实践性,这与研究方法的局限性有关;3) 研究方法缺乏统计资料、农户调查与试验研究的有机结合,绝大多数研究数据来自资料分析(如统计数据)或农户访问,很少试验,影响可靠性,而为数不多的来自试验的数据,又不能真实反映农户生产实情;4) 能量与物质平衡的研究相互之间缺乏必要的联系,能量是物质运动的动力,物质是能量的载体,两者脱节阻碍了全面揭示农业系统的结构与功能,难以形成系统调控的综合手段。

国内外对于系统能量平衡研究也有差异。国外注重辅助能投入和产出能的分析,把握重点和关键。国内多

从太阳能开始,通过能值换算,计测全部人工能量(如化肥、机械等)和自然能量(如太阳能、雨水、土壤)的投入。一般来说,两者各有所长。能值分析结果便于各种指标间和各类系统间比较,但结果的可靠性依赖于能值转换率的准确性。对于某一特定的农业系统,太阳能有规律变化,投入相对稳定,农业生产更多地依赖于人工辅助能;人工辅助能的单位比太阳能小5~7个数量级,其作用很容易被太阳能掩盖;作物一家畜综合生产系统中,家畜生产对太阳能最终的转化效率只有0.002%左右^[173],而且依赖于人工辅助能的管理;能量分析因为数据未经标准化,较为真实;因此,以人工辅助能为主的能量平衡分析具有一定的优点。然而,能量分析与能值分析并无本质对立,两者之间很容易通过能值转换率相互转化。

6 讨论与展望

作物一家畜综合系统既是人类进步的动力,也是社会发展的成果,客观反映了人类社会的整体发展水平;因此,在社会经济发展的空间梯度上,综合农业系统表现出较为完整的时间序列。以往的研究专注于系统的一个或几个组分,或者某个子系统,而对于系统的整体结构与功能认识不足。对于系统的能流与物流特征有一些报道,但是尚存在研究对象不全面、尺度单一、方法不可靠等问题,很多研究工作只针对作物系统,而非严格意义上的综合系统。研究过程中,能流分析与物流分析脱节,能量的属性不统一。因而不能全面、准确、深刻地认识综合系统的结构与特征,也就无法通过能量与物质调控维持系统健康。需要在农户和乡村尺度上,田间试验与农户调查有机结合,开辟农业系统研究的新方法。

集约化提高了农业系统的生产力,表现出明显的土地节约效应(land-sparing impact),缓解了人口与资源压力,成为各国农业系统发展的趋向。世界上6种主要作物的种植面积占土地总面积的80%,它们如果以1961年的单产水平达到2004年的总产量,就额外需要14亿 hm^2 耕地,超过当前耕地总面积的2倍,更多的草地和森林将被开垦^[73]。但是,基因技术、化石燃料、抗生素等的集约化投入也导致了环境负面效应;英国鸟类灭绝与农业集约化密切相关^[174];遗传修饰(genetically modified, GM)作物种植面积超过全球耕地的7%,大部分产品用于家畜生产,尽管GM作物产量增加、化学杀虫剂和除草剂用量减少^[55],却对生物多样性构成很大威胁^[79],通过作物→家畜→人的食物链对综合农业系统结构与功能的作用尚不得而知。反刍动物是作物一家畜综合系统的主要生产者,是 CH_4 、 N_2O 等温室气体的主要排放者, Nicholas Stern 预测,温室气体排放将抵消5%~20%的GDP^[175],建立综合农业系统的生态补偿机制举足轻重^[176],亟待研究。

欧美学者对本国集约化的作物一家畜综合系统、联合国组织力量对发展中国家粗放的综合系统开展了大量研究;北美大平原及其以东地区建立了一系列试验体系,代表了作物一家畜综合生产系统研究的国际水平。我国试验研究相对较少,不够系统,缺乏连续性;然而,在农业系统耦合与系统相悖、草地农业系统等综合系统的基础理论方面有一定优势^[148,169]。作为正在崛起的人口大国,我们需要双管齐下:既要在典型区域研究作物一家畜综合系统的结构与功能,重点是作物一家畜的耦合机制与调控,建立模式系统,为区域农业可持续发展提供基础理论与技术支撑;也要未雨绸缪,以集约化的综合系统为基础,率先探索生态与生产双赢的专门化生产系统。总之,既要认识到集约化农业系统是农业发展不可逾越的阶段(图1),也要竭力避免化石原料高强度投入的专门化系统所造成的环境与社会问题^[177],超越式发展、主动构建技术集约化的作物一家畜综合系统是现阶段草地农业建设必由之路。

参考文献:

- [1] Seré C, Steinfeld H. World Livestock Production Systems; Current status, Issues and Trends[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.
- [2] Blackburn H. Mixed farming systems and the environment: Livestock production, the environment and mixed farming systems[A]. In: Nell A J. Proceedings of the International Conference on Livestock and the Environment[M]. Wageningen, the Netherlands: International Agricultural Centre, 1998. 113-123.
- [3] Thornton P K, Kruska R L, Henninger N, et al. Mapping Poverty and Livestock in the Developing World[M]. Addis Ababa:

International Livestock Research Institute,2002.

- [4] Daily G, Dasgupta P, Bollin B, *et al.* Global food supply: Food production, population growth, and the environment[J]. *Science*, 1998, 281: 1291-1292.
- [5] Brookfield H, Stocking M. Agrodiversity: Definition, description and design[J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9: 77-80.
- [6] Mortimore M. A review of mixed farming systems in the semi-arid zone of Sub-Saharan Africa[A]. *Livestock Economics Division Working 17[M]*. Addis Ababa, Ethiopia; International Livestock Centre for Africa (ILCA), 1991.
- [7] Aguiar F, Botero R. Integrated agricultural systems: Options for sustainable production in the tropics[A]. *Electronic Seminar on "How to Install a Polyethylene Biogas Plant"[C]*. Integrated Bio-Systems Network International Organization of Biotechnology and Bioengineering, 2001.
- [8] Hou F J, Nan Z B, Xie Y Z, *et al.* Integrated crop-livestock production systems in China[J]. *The Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 221-231.
- [9] Reganold J P, Glover J D, Andrews P K, *et al.* Sustainability of three apple production systems[J]. *Nature*, 2001, 410: 926-929.
- [10] Hermansen J E. Organic livestock production systems and appropriate development in relation to public expectations[J]. *Livestock Production Science*, 2003, 80: 3-15.
- [11] Carr P M. Integrating crops and livestock by ley farming in North Dakota[A]. In *ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting Abstract (CDROM)[M]*. Salt Lake City, Utah, , 2005.
- [12] Gates R N. Integration of perennial forages and grazing in sod based crop rotations[A]. *Proceedings of Sod Based Cropping Systems Conference[C]*. North Florida Research and Education Center-Quincy, University of Florida, 2003.
- [13] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 244-264.
- [14] Meeker D L. What are the livestock industries doing, and what do they need from us? [J]. *Journal of Animal Science*, 1999, 77: 361-366.
- [15] Steinfeld H. The livestock revolution-veterinary mission[J]. *Veterinary Parasitology*, 2004, 125: 19-41.
- [16] Diamond J. Ants, crops, and history[J]. *Science*, 1998, 281: 1974-1975.
- [17] Diamond J. Location, location, location: The first farmers[J]. *Science*, 1997, 278: 1243-1244.
- [18] Lev-Yadun S, Gopher A, Abbo S. Enhanced: The cradle of agriculture[J]. *Science*, 2000, 288: 1602-1603.
- [19] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, *et al.* Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277: 494-499.
- [20] 任继周, 侯扶江, 张自和. 发展草地农业推进我国西部可持续发展[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(1): 19-24.
- [21] 任继周. 农耕文化圈与畜牧文化圈在黄土高原上的嬗替[A]. 周光召, 朱光亚. 共同走向科学: 百名院士科技系列报告集(中册)[M]. 北京: 新华出版社, 1997.
- [22] 任继周. 草地农业生态系统通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [23] 侯扶江, 李广. 河西地区生态景观的演变[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 51-57.
- [24] Pingali P L. Crop-livestock systems for tomorrow's Asia: From integration to specialization[A]. In: Devendra C, Sevilla C. *Crop-Animal Interaction International Rice Research Institute Discussion Paper Series No 6[C]*. Manila, 1993. 481-500.
- [25] Devendra C, Thomas D. Crop-animal systems in Asia; Importance of livestock and characterisation of agro-ecological zones[J]. *Agricultural Systems*, 2002, 71: 5-15.
- [26] Koelsch R, Powell M. Whole farm environmental accountability[A]. *The John M. Airy Symposium: Visions for Animal Agriculture and the Environment[M]*. Kansas City, Missouri, USA, , 2006.
- [27] Lee K J. Integrated crop-livestock production on slopelands in Korea[A]. *Extension Bulletin ASPAC[M]*. Food and Fertilizer Technology Center, 1995.
- [28] Naylor R, Steinfeld H, Falcon W, *et al.* Losing the links between livestock and land[J]. *Science*, 2005, 310: 1621-1622.
- [29] Powell J M, Pearson R A, Hiernaux P H. Crop-livestock interactions in the west African drylands[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 469-483.
- [30] Steinfeld H. Livestock and their interaction with the environment: An overview[A]. In: Gill M, Smith T, Pollott G E, *et al.*

- Food, Lands and Livelihoods—Setting Agendas for Animal Science[M]. British Society of Animal Science Occasional Publication, No. 21. 1998. 67-76.
- [31] Brothwell D. Early history of agriculture[J]. *Nature*, 1975, 255: 368-370.
- [32] Bettinger R L. Echoes from the dreamtime: Analyzing hunter-gatherer societies past, present and might-have-been[J]. *Nature*, 2001, 413: 567-568.
- [33] Gebregziabher S, Mouazen A M, Van Brussel H, *et al.* Animal drawn tillage, the Ethiopian ard plough, maresha: A review[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 89: 129-143.
- [34] Bailis R, Ezzati M, Kammen D M. Mortality and greenhouse gas impacts of biomass and petroleum energy futures in Africa[J]. *Science*, 2005, 308: 98-103.
- [35] Meadows M E. Soil erosion in the Swartland, Western Cape Province, South Africa: Implications of past and present policy and practice[J]. *Environmental Science and Policy*, 2007, 6: 17-28.
- [36] Murgai R, Ali M, Byerlee D. Productivity growth and sustainability in post-green revolution agriculture: the case of the Indian and Pakistan Punjab[J]. *The World Bank Research Observer*, 2001, 16(2): 199-218.
- [37] Sainz R D. Framework for Calculating Fossil Fuel Use in Livestock Systems[M]. Rome: Technical Report. Food and Agriculture Organization, 1999.
- [38] Chapin III F S, Zavaleta E S, Eviner V T, *et al.* Consequences of changing biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405: 234-242.
- [39] Mustard J F, Defries R S, Fisher T, *et al.* Land use and land cover change pathways and impacts[A]. In: Gutman G, Janetos A C, Justice C O, *et al.* Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2005. 441-429.
- [40] Defries R S, Foley J A, Asner G P. Land-use choices: Balancing human needs and ecosystem function[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(5): 249-257.
- [41] Erickson C L. An artificial landscape-scale fishery in the Bolivian Amazon[J]. *Nature*, 2000, 408: 190-193.
- [42] Bray W. Ancient food for thought[J]. *Nature*, 2000, 408: 145-146.
- [43] Araus J L, Ferrio J P, Buxo' R, *et al.* The historical perspective of dryland learned from 10000 years of wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 131-145.
- [44] Balter M. Seeking agriculture's ancient roots[J]. *Science*, 2007, 316: 1830-1835.
- [45] Bidwell P W, Falconer J I. History of agriculture in the northern United States, 1620—1860[J]. *Nature*, 1926, 117: 506-508.
- [46] Richardson L A. Changes in livestock production in the south[J]. *Journal of Animal Science*, 1940, (1): 367-371.
- [47] White R, Murray S, Rohweder M. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystem[M]. Washington D C: World Resources Institute, 2000.
- [48] Moffat A S. South American landscapes: Ancient and modern[J]. *Science*, 2002, 296: 1959-1961.
- [49] Verheyen K, Bossuyt B, Hermy M, *et al.* The land use history (1278—1990) of a mixed hardwood forest in western Belgium and its relationship with chemical soil characteristics[J]. *Journal of Biogeography*, 1999, 26: 1115-1128.
- [50] White J, Hodgson J. New Zealand Pasture and Crop Science[M]. Oxford University Press, 1999.
- [51] Ashby A W, Evans I L. Welsh farming—the agriculture of wales and monmouthshire[J]. *Nature*, 1945, 155: 31-32.
- [52] Strail D M. Trends in the export of livestock products[J]. *Journal of Animal Science*, 1927, (1): 248-255.
- [53] Russell J. Agriculture after the war[J]. *Nature*, 1942, 149: 12-14.
- [54] Matson P A, Parton W J, Power A G, *et al.* Agricultural intensification and ecosystem properties[J]. *Science*, 1997, 277: 504-509.
- [55] Huang J K, Pray C, Rozelle S. Enhancing the crops to feed the poor[J]. *Nature*, 2002, 418: 678-684.
- [56] Hazell P B R. Green revolution, curse or blessing? [A]. In: Mokyr J. Encyclopedia of Economic History[M]. Oxford University Press, 2003.
- [57] Wilkins R J. Grassland in the Twentieth Century[M]. IGER Innovations, 2000. 25-33.
- [58] Tilman D, Gassmand K G, Matson P A, *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002,

418;671-677.

- [59] MacClwain C. Organic; Is it the future of farming? [J]. *Nature*,2004,428:791-792.
- [60] Buttler S J, Vickery J A, Norris K. Farmland biodiversity and the footprint of agriculture[J]. *Science*,2007,315:381-384.
- [61] Björklund J, Limburg K E, Rydberg T. Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: An example from Sweden[J]. *Ecological Economics*, 1999,29:269-291.
- [62] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, *et al.* *Livestock's Long Shadow*[M]. FAO, Rome, 2006.
- [63] Sanchez J E, Harwood R R, Willson T C, *et al.* Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality[J]. *Agronomy Journal*,2004,96:769-775.
- [64] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. *Science*,2000, 289:1922-1925.
- [65] Zinsstag J, Weiss M G. Livestock diseases and human health[J]. *Science*,2001,294:477.
- [66] Grau H R, Aide T M, Zimmerman J K, *et al.* The ecological consequences of socioeconomic and land-use changes in postagriculture, Puerto Rico[J]. *BioScience*,2003,53(12): 1159-1168.
- [67] Oomena G J M, Lantingab E A, Goewiea E A, *et al.* Mixed farming systems as a way towards a more efficient use of nitrogen in European Union agriculture[J]. *Environmental Pollution*, 1998,102:697-704.
- [68] Rochon J J, Doyle C J, Greef J M, *et al.* Grazing legumes in Europe: A review of their status, management, benefits, research needs and future prospects[J]. *Grass and Forage Science*,2004, 59:197-214.
- [69] Wilkins R J. Eco-efficient approaches to land management: A case for increased integration of crop and animal production systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*,2008,36:517-525.
- [70] van Keulen H, Schiere H. Crop-livestock systems: Old wine in new bottles? [A]. *New Directions for a Diverse Planet*[C]. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 2004.
- [71] Wood S, Sebastian K, Scherr S J. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Agroecosystems*[M]. Washington D C: World Resources Institute,2000.
- [72] Matthews E, Payne R, Rohweder M, *et al.* *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Forest Ecosystem*[M]. Washington D C. World Resources Institute,2000.
- [73] Mooney H, Cropper A, Reid W. Confronting the human dilemma[J]. *Nature*,2005,434:561-562.
- [74] Borlaug N. Feeding a hungry world[J]. *Science*,2007,318:359.
- [75] Gill M, Smith P. Mitigating climate change: The role of livestock in agriculture[A]. In: Prolinson P, Steele M, Nefzaoui. *Proceedings of International Conference: Livestock and Global Climate Change 2008*[C]. Cambridge University Press,2008. 29-30.
- [76] Heitschmidt R K, Vermeire L T, Grings E E. Is rangeland agriculture sustainable? [J]. *Journal of Animal Science*,2004,82 (Suppl.):138-146.
- [77] Poštrk V. *The Livestock Revolution-Dietary Transition: Global Rise in Consumption of Animal Food Products*[M]. Master's Thesis at Lunds Universitet Sweden,2003.
- [78] Palumbi S R. Humans as the world's greatest evolutionary force[J]. *Science*,2001,293:1786-1790.
- [79] Hails R S. Assessing the risks associated with new agricultural practices[J]. *Nature*,2002, 418:685-688.
- [80] Tilman D, Fargione J, Wolff B, *et al.* Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*,2001,292: 281-284.
- [81] Allen V G, Brown P C. Using grazing animals to restore resilience in our agricultural systems[A]. *The John M Airy Symposium: Vision for Animal Agriculture and the Environment*[M]. Kansas City, Missouri, January,2006.
- [82] Delgado C L. Rising Consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution[J]. *The Journal of Nutrition*,2003,133:3907-3910.
- [83] Nelson L. What is organic farming? [J]. *Nature*,2004,428:796-798.
- [84] Diamond J, Bellwood P. Farmers and their languages: The first expansions[J]. *Science*, 2003,300:597-603.

- [85] Denham T P, Haberle S G, Lentfer C, *et al.* Origins of agriculture at Kuk swamp in the highlands of New Guinea[J]. *Science*, 2003, 301:189-193.
- [86] Sandweiss D H, Maasch K A, Anderson D G. Transitions in the mid-holocene[J]. *Science*, 1999, 22:499-500.
- [87] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record[J]. *Science*, 2008, 322:940-942.
- [88] 任继周, 侯扶江. 草业科学框架纲要[J]. *草业学报*, 2004, 13(4):1-6.
- [89] 任继周, 胡自治, 牟新待, 等. 草原的综合顺序分类法及其草原发生学意义[J]. *中国草原*, 1980, 1:12-24.
- [90] 胡自治, 高彩霞. 草原综合顺序分类法的新改进. I类的划分指标及其分类检索图[J]. *草业学报*, 1995, 4(3):1-7.
- [91] Entz M H. Integrated crop-livestock systems in nonirrigated, semiarid and sub-humid environments[A]. ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting abstract (CDROM)[M]. Salt Lake City, Utah, 2005.
- [92] Suttie J M, Reynolds S G, Batello C. Grasslands of the World[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [93] 山仑, 徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J]. *草业学报*, 2009, 18(2):1-2.
- [94] Ndlovu L R, Bwakura T, Topps J H. The role of donkeys in integrated crop-livestock systems in semi-arid areas of Zimbabwe[A]. In: Starkey P, Fielding D. Donkeys, People and Development[M]. Wageningen, The Netherlands: 2004, 188-191.
- [95] Hou F J, Nan Z B. Improvements to rangeland livestock production on the Loess Plateau: A case study of Daliangwa village, Huanxian county[J]. *草业学报*, 2006, 15(增刊):104-110.
- [96] Harris F. Nutrient management strategies of small-holder farmers in a short-fallow farming system in north-east Nigeria[J]. *Geographical Journal*, 1999, 165:275-285.
- [97] Hiernaux P, Fernandez-Rivera S, Schlecht E, *et al.* Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems[A]. In: Renard G, Neef A, Becker K, *et al.* Soil Fertility Management in West African Land Use Systems[M]. Weikersheim, Germany: Margraf Verlag, 1997, 339-347.
- [98] Tarawali G. A synthesis of the crop-livestock production systems of the dry savannas of West and Central Africa[A]. Improving Crop-Livestock Systems in West and Central Africa[M]. Ibadan, Nigeria: IITA, 2002.
- [99] Turner M D. Long term effects of daily grazing orbits on nutrient availability in Sahelian West Africa: 1. Gradients in the chemical composition of rangeland soils and vegetation[J]. *Journal of Biogeography*, 1998, 25(4):669-682.
- [100] Turner M D. Long term effects of daily grazing orbits on nutrient availability in Sahelian West Africa: 2. Effects of a phosphorus gradient on spatial patterns of annual grassland production[J]. *Journal of Biogeography*, 1998, 25(4):683-694.
- [101] Kaushik S J. Animals for work, recreation and sports[J]. *Livestock Production Science*, 1999, 59:145-154.
- [102] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. *草业学报*, 2008, 17(2):126-135.
- [103] Bogue A G. Farming in the north American grasslands: A survey of publications, 1947-80[J]. *The Great Plains Quarterly*, 1981, 1(2):105-131.
- [104] Padgett M, Newton D, Penn R, *et al.* Production Practices for Major Crops in US Agriculture, 1990-97[M]. Economic Research Service, USDA. Washington D C, US., 2000.
- [105] Moore A D, Grace P R. Effects of annual pasture composition on subsequent wheat yields in the Waite Permanent Rotation Trial, South Australia[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, 38(1):55-59.
- [106] Bhathal J S, Loughman R. Ability of retained stubble to carry-over leaf diseases of wheat in rotation crops[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2001, 41(5):649-653.
- [107] Hamblin A. Poor soils and erratic markets: sustainability issues for Australian grain and cane farming[A]. Food & Fertilizer Technology Center[M]. CRC Soil and Land Management Glen Osmond. South Australia, Australia, 1995.
- [108] Lancashire J A. Special address: 150 years of grassland development in New Zealand[J]. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 1990, 52:9-15.
- [109] 周禾. 法国的草地农业[J]. *世界农业*, 1995, (11):19-20.
- [110] 丁成龙, 顾洪如, 常志州. 日本粗饲料生产及调制加工[J]. *世界农业*, 2003, (1):45-47.

- [111] 蒋文兰,付照武. 栽培草地绵羊放牧系统优化生产模式研究[J]. 草业学报,1995,4(3):55-63.
- [112] 李向林. 中国亚热带地区的草地农业系统[A]. 中国农区草业发展论文集[M]. 北京:中国农业大学出版社,2002. 46-52.
- [113] Beetz A. Agroforestry overview. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas. Fayetteville, Arkansas, US. 2002. [EB/OL]. <http://www.attra.ncat.org>, 2002.
- [114] Arevalo L A, Alegre J C, Bandy D E, *et al.* The effects of cattle grazing on soil physical and chemical properties in a silvopastoral system in the Peruvian Amazon[J]. *Agroforestry Systems*, 1998, 40(2):109-124.
- [115] Sibbald A R, Clements V, Campero V, *et al.* Soil-plant-animal interactions in the establishment phase of a silvopastoral system in NE Scotland[J]. *Agroforestry Forum*, 1997, 8(3):23-26.
- [116] Husak A L, Grado S C. Monetary and wildlife benefits in a silvopastoral systems[A]. Proceeding of the 2001 Southern Forest Economics Workshop[M]. Lexington, KY, US., 2000. 167-175.
- [117] Krzic M, Ballard T M, Broersma K, *et al.* Lodgepole pine nutrition and growth on grazed forest cutblocks in southern British Columbia. BC[J]. *Journal of Ecosystems and Management*, 2001, 1(2):1-8.
- [118] Thompson D J, Newman R F, Hope G, *et al.* Nitrogen cycling in silvopastoral systems in the Pacific Northwest: A review[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2000, 80:21-28.
- [119] Norbu L. Grazing management in broadleaf forests[J]. *Journal of Bhutan Studies*, 2002, 7:99-129.
- [120] Herenda D, Chambers P G, Ettriqui A, *et al.* Manual on meat inspection for developing countries[A]. FAO Animal Production and Health[M]. Rome, Italy, 1994.
- [121] Jayanthi C, Balusamy M, Chinnusamy C, *et al.* Integrated nutrient supply system of linked components in lowland integrated farming system[J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2003, 48(4):241-246.
- [122] Shekinah D E, Jayanthi C, Sankaran N. Physical indicators of sustainability- a farming systems approach for the small farmer in the rainfed vertisols of the western zone of Tamil Nadu[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2005, 25(3):43-65.
- [123] Rautaray S K, Dash P C, Sinhababu D P. Increasing farm income through rice (*Oryza sativa*) - fish based integrated farming system in rainfed lowlands of Assam[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 75(2):79-82.
- [124] Devendra C. The development of integrated systems[A]. Sustainable Animal Production from Small Farm Systems in South-East Asia[M]. Rome, Italy: FAO, 1993.
- [125] 聂呈荣, 骆世明, 章家恩, 等. 现代集约农业下基塘系统的退化与生态恢复[J]. *生态学报*, 2003, 23(9):1851-1860.
- [126] 郑建初, 谭淑豪, 刘华周, 等. 中国稻鸭共作系统的理论与技术现状及其发展策略[J]. *江苏农业科学*, 2005, (5):1-5.
- [127] Sulc R M. Integrated crop-livestock systems in humid, cool temperate environments of North America[A]. In ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting abstract (CDROM)[C]. Salt Lake City, Utah, 2005.
- [128] Ramaswamy N S. Draught animal welfare[J]. *Applied animal behaviour Science*, 1998, 59:73-84.
- [129] Fresco L O, Steinfeld H. A food security perspective to livestock and the environment[A]. In: Nell A J. Proceedings of the International Conference on Livestock and the Environment[C]. International Agricultural Centre, Wageningen, the Netherlands, 1998.
- [130] Franzluebbers A J. Integrated crop-livestock systems in the southern USA[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99:361-372.
- [131] Acosta-Martínez V, Zobeck T M, Allen V G. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop-livestock systems[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 68:1875-1884.
- [132] Allen V G, Hou F J, Brown P, *et al.* Integrated crop and livestock systems in the Texas High Plains[J]. Invited keynote presentations by the 2nd China-Japan-Korea Grassland Conference. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(suppl.):3-38.
- [133] Zhang W J, Feng J X, Wu J, *et al.* Differences in soil microbial biomass and activity for six agroecosystems with a management disturbance gradient[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4):441-447.
- [134] Zhang W J, Rui W Y, Tu C, *et al.* Responses of soil microbial community structure and diversity to agricultural deintensification[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(4):440-447.
- [135] Wright D, Marois J J, Katsvairo T, *et al.* Livestock integration into cotton/peanut rotations: A tri-state project[A]. ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting Abstract (CDROM)[C]. Salt Lake City, Utah, 2005.

- [136] Franco-Vizcaíno E. Comparative soil quality in maize rotations with high or low residue diversity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 24(1):32-38.
- [137] Drinkwater L E, Wagoner P, Sarrantonio M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses[J]. *Nature*, 1998, 396:262-265.
- [138] Tilman D. The greening of the green revolution[J]. *Nature*, 1998, 396:211-212.
- [139] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化[J]. *草业学报*, 2009, 18(1):1-8.
- [140] Powell J M, Ikpe F N, Sonda Z C, *et al.* Urine effects on soil chemical properties and impact of dung and urine on pearl millet yield[J]. *Experimental Agriculture*, 1998, 34:259-276.
- [141] Norton M R, Murison R, Holford I C R, *et al.* Rotation effects on sustainability of crop production: The Glen Innes rotation experiments[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995, 35:893-902.
- [142] 李毓堂. 确保我国粮食安全的战略途径——发展牧草绿色蛋白, 减少饲料用粮[J]. *草业科学*, 2009, 26(2):1-4.
- [143] Anghinoni I, Flores J P C, Carvalho P C F, *et al.* Soil chemical properties of a rhodic hapludox soil after surface application in an integrated crop-livestock system[A]. *ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting Abstract (CDROM)[C]*. Salt Lake City, Utah, 2005.
- [144] Hou F J, Allen V G, Brown P, *et al.* Growth of rye and cotton in a rye-cotton-wheat rotation as affected by cattle grazing[A]. *ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting abstract (CDROM)[C]*. Salt Lake City, Utah, 2005.
- [145] Entz M H, Barson V S, Carr D W, *et al.* Potential of forages to diversify cropping systems in the northern Great Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94:240-250.
- [146] Mattner S W, Parbery D G. Rust-enhanced allelopathy of perennial ryegrass against white clover[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 42(1):19-26.
- [147] Mitchell C C, Delaney D P, Balkcom K S. A historical summary of Alabama's Old Rotation (circa 1896): The world's oldest, continuous cotton experiment[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100:1493-1498.
- [148] 任继周, 万长贵. 系统耦合与荒漠——绿洲草地农业系统[J]. *草业学报*, 1994, 3(3):1-8.
- [149] Angus J, Gummer F, Virgona. Increased yield of winter wheat by grazing[A]. *ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting abstract (CDROM)[C]*. Salt Lake City, Utah, 2005.
- [150] 袁庆华, 蒋文兰. 羊群宿营对蛴螬控制及草地恢复的影响[J]. *中国草地*, 1995, 2: 15-19.
- [151] Allen V G, Brown C P, Rellison R, *et al.* Integrating cotton and beef production to reduced water withdrawal from the Ogallala Aquifer in the Southern High Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97:556-567.
- [152] Roxas D B, Wanapat M, Winugroho M. Dynamics of feed resources in mixed farming systems in Southeast Asia[A]. In: *Reynard C. Crop Residues in Sustainable Mixed Crop/Livestock Farming Systems[M]*. CAB International, 1997.
- [153] Oltjen J W, Beckett J L. Role of ruminant livestock in sustainable agriculture systems[J]. *Journal of Animal Science*, 1996, 74:1406-1409.
- [154] Mapfumo E, Chanasyk D S, Baron V S, *et al.* Grazing impacts on selected soil parameters under short-term forage sequences[J]. *Journal of Range Management*, 2000, 53:466-470.
- [155] Parsons A J, Leafé E L, Collett B, *et al.* The physiology of grass production under grazing II. Photosynthesis, crop growth and animal intake of continuously-grazed swards[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1983, 20:127-139.
- [156] Howden S M, Reyenga P J. Methane emissions from Australian livestock: Implications of the Kyoto Protocol[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1999, 50(8):1285-1292.
- [157] Soussana J F. The role of the carbon cycle for the greenhouse gas balance of grasslands and of livestock production systems[A]. In: *Prolinson P, Steele M, Nefzaoui. Proceedings of International Conference: Livestock and Global Climate Change 2008[C]*. Cambridge University Press, 2008. 12-15.
- [158] McCarl B A, Schneider U A. Greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry[J]. *Science*, 2001, 294:2481-2482.
- [159] Haas G, Wetterich F, Kopke U. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process of life cycle analysis[J]. *Agriculture, ecosystems & Environment*, 2001, 83:43-53.

- [160] Ozkan B, Alcaoz H, Fert C. Energy input-output analysis in Turkish agriculture[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(1): 39-51.
- [161] Cecon P, Coiutti C, Giovanardi R. Energy balance of four farming systems in north-eastern Italy[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2002, 6(1): 73-83.
- [162] Kuniyal J C, Vishvakarma S C R, Singh G S. Changing crop biodiversity and resource use efficiency of traditional versus introduced crops in the cold desert of the northwestern Indian Himalaya: A case of the Lahaul valley[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13: 1271-1304.
- [163] 林慧龙, 肖金玉, 侯扶江. 河西走廊山地-荒漠-绿洲复合生态系统耦合模式及耦合宏观经济价值分析——以肃南山地-张掖北山地区荒漠-临泽绿洲为例[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 965-971.
- [164] 黄子蔚, 杨德刚, 李秀萍, 等. 塔里木河中下游农户能流分析及生态经济分形特征[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(3): 308-312.
- [165] 董孝斌, 高旺盛, 隋鹏, 等. 北方农牧交错带典型农户系统的能值分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 78-82.
- [166] 张富忠, 侯桂凤. 环县草畜产业现状[J]. *草业科学*, 2009, 26(4): 159-160.
- [167] von Braun J, Pandya-Lorch R. Income sources of malnourished people in rural areas: Micro-level information and policy implications[A]. Working Papers on Commercialization of Agriculture and Nutrition No. 5[M]. Washington DC: International Food Policy Research Institute, 1991.
- [168] McIntire J, Bourzat D, Pingali P. Crop Livestock Interactions in Sub-Saharan Africa[M]. Washington DC: World Bank, 1992.
- [169] 任继周. 从“澳大利亚式敬礼”说到沼气[J]. *草业科学*, 2004, 21(2): 57-58.
- [170] 李文华. 生态农业, 中国可持续农业的理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [171] 隋春花, 陆宏芳, 郑凤英. 基于能值分析的广东省生态经济系统综合研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2147-2152.
- [172] 卢远, 韦燕飞, 邓兴礼, 等. 岩溶山区农业生态系统的能值动态分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 166-169.
- [173] Heitschmidt R K. The ecology of grazing management[A]. In: Baker M J. Grassland for Our World[M]. New Zealand: Sir Publishing, 1993. 477-480.
- [174] Krebs J R, Wilson J D, Bradbury R B, *et al.* The second silent spring? [J]. *Nature*, 1999, 400: 611-612.
- [175] Giles J. How much will it cost to save the world? [J]. *Nature*, 2006, 444: 6-7.
- [176] James A N, Gaston K J, Balmford A. Balancing the earth's accounts[J]. *Nature*, 1999, 401: 323-324.
- [177] 侯扶江. 岁末寄语[J]. *草业科学*, 2008, 25(12): 封二.

Integrated crop-livestock production system

HOU Fu-jiang, NAN Zhi-biao, REN Ji-zhou

(Engineering Research Center of Pastoral Agriculture Ministry of Education, Engineering and Technology Research Center of Pastoral Agriculture in Western China Gansu Province, Key Laboratory of grassland and Agro-ecosystem Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agriculture Science and Technology Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Both crop and livestock play key roles in agricultural system. In the integrated crop-livestock production system, there is an intact net of matter flow and energy flow between crop sub-system and livestock sub-system and residues of one sub-system often are used as raw material of another one. The interaction between crop and livestock has promoted evolution of agricultural system and there have been six stages: Originally hunting and foraging system (OHF), originally integrated crop-livestock production system (OICL), extensively specialized production system (ES) including extensively specialized crop production system (ESC) and extensively specialized livestock production system (ESLP), extensively integrated crop-livestock production system (EICL), intensively specialized production system (IS) including intensively specialized crop production system (ISC) and intensively specialized livestock production system (ISL), intensively integrated crop-livestock production system (IICL). And there have taken place two specializations and three integrations of crop production and livestock production during evolution of agricultural system and productivity has risen in a spiral. Integrated crop-livestock production system comprises six dominant types: classical system (C-ICL), system based on rangeland (ICL-R), system based on crop/forage rotation (ICL-CF), system based on sown pasture (ICL-SP), system based silvo-pasture (or woodland) (ICL-W, agro-silvopastoral system) and system based on pond (ICL-P). Furthermore, one type of system could succeed to the other one along the given environmental gradient. Intensive agricultural system is mainly prevalent in developed countries, whilst extensive one is dominant in developing countries, and intensive system is significantly different from extensive system in light of components, interaction of crop and livestock, input of outside, productivity and management goals. Crop-livestock interaction in integrated agricultural system has significantly positive effects on soil quality, crop production, microorganism activity, livestock production, nutrition circle, energy efficiency and economic profitability. In terms of property, succession, structure and function of integrated crop-livestock production system, there exist some similarities and distinctions between domestic and international research. However, the current research is in face of some common difficulties, which mainly include incompleteness of research object, singleness of research scale, unreliable methods, ignorance of livestock subsystem and gap between energy analysis and matter analysis.

Key words: agriculture; crop; livestock; integrated crop-livestock production; mixed farming system; energy balance analysis; grazing