



蒋高明,刘美珍,赵建设. 试论生态农业的边界与科学技术原理[J]. 中国农业大学学报,2024,29(06):8-18.

JIANG Gaoming, LIU Meizhen, ZHAO Jianshe. Discussion on the boundary of eco-agriculture and its scientific technology principles[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 8-18.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.02

## 试论生态农业的边界与科学技术原理

蒋高明<sup>1,2</sup> 刘美珍<sup>1,2</sup> 赵建设<sup>3</sup>

(1. 中国科学院植物研究所/植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 河南中远有机农业研究所, 郑州 450053)

**摘要** 由于生态农业概念模糊,加之边界不清,生态学界对生态农业科学原理与技术总结不够,公众对生态农业理解有误,阻碍了生态农业产业发展。本研究通过总结、归纳和分析1982—2022年发表的相关文献,回顾了国内外生态农业提出的背景及其含义,分析了现代农业的9种主要形态及其特征,重新定义了生态农业的概念,厘清了生态农业的边界,提出了指导生态农业发展的理论体系与科学技术原理。并以山东省平邑县弘毅生态农场18年实践为例,实证了本研究提出的生态农业概念、理论与技术体系具有重要的应用与推广价值。

**关键词** 生态农业; 科学原理; 范畴; 应用技术; 食品安全

中图分类号 F323.3

文章编号 1007-4333(2024)06-0008-11

文献标志码 A

## Discussion on the boundary of eco-agriculture and its scientific technology principles

JIANG Gaoming<sup>1,2</sup>, LIU Meizhen<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianshe<sup>3</sup>

(1. Institute of Botany/State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Henan Institute of Organic Agriculture, Zhengzhou 450053, China)

**Abstract** Due to the unclear concept of eco-agriculture and the vague boundary, the scientific principles and technologies of eco-agriculture have not been well summarized, resulting in a serious misunderstanding of eco-agriculture in the society, which hindered the development of eco-agriculture industry. On the basis of summarizing the relevant literatures published from 1982 to 2022, this study briefly reviewed the background and significance of eco-agriculture concept at home and abroad, and analyzed the 9 main forms and characteristics of modern agriculture, the concept and the boundaries of eco-agriculture have been refined and clarified. Then we have proposed a theoretical system of science and technology to guide the health development of eco-agriculture. Finally, taking the 18 years practice of Hongyi Ecological Farm in Pingyi County, Shandong Province as an example, this study proves that the concept, theory, and technology system of eco-agriculture proposed here have important application and promotion values.

**Keywords** modern eco-agriculture; scientific principles; category; application technology; food security

收稿日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071604)

第一作者: 蒋高明(ORCID:0000-0002-5797-731X), 研究员, 主要从事植物生理生态学和农业生态学研究, E-mail: jgm@ibcas.ac.cn

第一次绿色革命以来,农业科学技术不断更新,大量人工合成化学物质应用到种植和养殖过程中,提高了单位土地面积产出,满足了19个发展中国家对食物的需求<sup>[1]</sup>。然而,数量型农业以牺牲食物质量、生态环境和人类健康为代价<sup>[2]</sup>,该农业模式并不可持续,生态农业和有机农业应运而生<sup>[3-5]</sup>。

生态农业之所以重要,是因为其对环境与健康保护意义重大。现代农业高度依赖石化能源、化学肥料、农药与地膜等,这些化学物质的生产、运输与使用,释放了大量温室气体<sup>[6-7]</sup>,造成严重的环境污染。过量施用化肥,尤其是氮肥,导致土壤酸化严重。以中国为例,2019年化肥平均使用量以N计为325 kg/hm<sup>2</sup>,远远超过世界平均水平123 kg/hm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。据不完全统计,中国公布使用的农药、化肥、添加剂、兽药等种类高达50 626种<sup>[9]</sup>。过量使用化肥,导致土壤酸碱度下降<sup>[10]</sup>、土壤板结、耕地质量下降、生产力降低、土壤侵蚀、土壤有机质流失等问题。全球每年仅与土壤侵蚀有关的公共和环境健康损失就超过450亿美元<sup>[11]</sup>。现代农业模式下,全球每年约460万t化学农药喷洒到环境中,其中99%释放到土壤、水体和大气中<sup>[12]</sup>。另外,农用地膜的广泛使用污染了农田环境,造成严重的“白色污染”<sup>[13]</sup>。

以第一次绿色革命为标志的数量型农业,忽略了食物的营养与健康功能,导致作物营养品质下降<sup>[14-15]</sup>,造成隐性饥饿问题,由此威胁着世界上20多亿人口<sup>[16]</sup>。隐性饥饿是由于营养不平衡、或缺乏某种维生素、或缺乏人体必须的矿物质,同时其他营养成分过度摄入,所产生的隐蔽性营养需求的饥饿症状。隐性饥饿能引起慢性疾病和其他健康失调<sup>[17]</sup>,如最常见的Fe、I和维生素A缺乏导致的各种疾病。最易受隐性饥饿威胁的人群是生育年龄的妇女、儿童和老人<sup>[18]</sup>。已有研究表明,因农药污染,儿童智力也受到影响<sup>[19]</sup>。人类多种重大疾病爆发、寿命降低、不育不孕疾病流行与传统农耕方式改变密不可分<sup>[20-22]</sup>。

为解决现代化学农业带来的问题,国内外学者和政府都进行了各种理论探索与实践<sup>[23-24]</sup>。20世纪80年代,侯学煜<sup>[25]</sup>提出了“大农业”“大粮食”观点,指出森林、草原、农田、水域等应分别属于不同的生态系统类型,但从区域观点出发,山、水、林、

田、湖、路、村是相互联系的,农、林、牧、副、渔构成了特殊的生态系统,其中不同子系统都能够生产或提供食物,不能搞“围湖造田”“毁林开荒”“向草原要粮”等极端的农业模式。侯学煜的上述观点,为生态农业发展奠定了重要理论基础。

1993年,由农业部等7个部委局组成的“全国生态农业县建设领导小组”启动了第一批51个生态农业县建设工作<sup>[26]</sup>。2000年,国家启动了第二批50个全国生态农业县建设工作,同时提出在全国大力推广和发展生态农业的任务。2002年,农业部向全国征集到了370种生态农业模式或技术体系,遴选出具有代表性的10个生态农业模式类型,包括北方“四位一体”模式、南方“猪-沼-果(稻、菜、鱼)”模式、平原农林牧复合模式、草地生态恢复与持续利用模式、生态种植模式、生态畜牧业生产模式、生态渔业模式、丘陵山区小流域综合治理利用型模式、设施生态农业模式和观光生态农业模式<sup>[27-28]</sup>。

生态农业经历近半个世纪的发展,引起了越来越多的关注。在政策层面上,中国加大了对生态农业的扶持力度,作为生态农业主要场所的生态农场,得到了国家农业农村部的重视。农业农村部按照《“十四五”全国农业绿色发展规划》有关要求,制定了《推进生态农场建设的指导意见》,以加快推进生态农场建设,促进农业绿色低碳转型<sup>[29]</sup>。

然而,在现代农业大背景下,生态农业没有起到遏制农业生态系统与人类健康退化的趋势。生态农产品没有得到市场认可,依然停留在小众范围之内。随着社会经济的发展与农业科学技术的不断进步,生态农业原有的含义已不适当今发展需求,突出表现在概念模糊、边界不清,较多非生态农业元素如农药、化肥、地膜、激素、反季节种植与养殖、无土栽培等都混在生态农业中。由于生态农业的科学原理不明,人们将生态农业简单等同于原始农业,没有形成独特的产业。在陈旧理论指导下,生态农业所使用的科学技术被忽略,转而使用大量化学农业技术,严重阻碍了生态农业发展与生态文明建设。本研究试就生态农业相关热点问题,尤其从生态农业的概念、意义、范畴、科学原理与应用技术等方面介绍有关进展,以期引领生态农业产业发展提供理论依据。

## 1 当前农业的9种形态

表1梳理了当前可为人类提供食物的9种主要农业形态。集约化农业也叫单一农业,或采取精量播种、化肥深施、秸秆还田、节水灌溉等措施,提高农业资源利用率;或进行抢收抢种、抗旱排涝、大规模病虫害防治;或进行农田水利建设保障作物水分供应;或利用现代生物技术,让病虫害管理变得更简单;或利用信息技术、工程技术、肥料技术等,进一步提高农产品单位产量<sup>[28]</sup>。其中肥料技术应用最广,具体分类如下:按化学成份可划

分为有机肥料、无机肥料(化肥)、有机无机肥料等;按养分组成可划分为单质肥料、复混(合)肥料(多养分肥料)等;按肥效作用方式可划分为速效肥料、缓效肥料等;按肥料物理状况可划分为固体肥料、液体肥料、气体肥料等;按肥料的化学性质可划分为碱性肥料、酸性肥料、中性肥料等。除此之外,还有生物菌肥、矿物肥、叶面肥等。集约化农业使产量大幅度提高,为典型数量型农业,但在粮食增产的同时,也带来环境污染、温室气体排放、生物多样性下降与人类健康隐患等问题。

表1 当前9种现代农业的形态、主要特征与应用范围

Table 1 Forms, main features and application areas of current modern agriculture

形态 Form	主要特征 Main feature	应用范围 Application area	文献来源 Reference
集约化农业 Intensive agriculture	石化农资投入大、规模化经营、产量高、机械化程度高;存在严重环境污染,生物多样性下降,增加温室气体排放	大田作物为主	[28]
设施农业 Facility agriculture	反季节种植、工厂化养殖,存在白色污染、抗生素污染等	蔬菜、禽类与猪、牛、羊养殖、室内水产养殖等	[30-31]
植物工厂 Plant factory	不需要土壤,营养液输入;使用人造光源;易出现白色污染	蔬菜为主	[32]
住宅农业 Residential agriculture	城市屋顶种植或农村庭院种植,养分循环,但规模小;可补充家庭食物需求	蔬菜为主、少量果树或动物	
白色农业 White agriculture	利用农林废弃物培养真菌,有效促进养分循环;存在白色污染问题	蘑菇生产为主	[33]
蓝色农业 Marine agriculture	海洋人工养殖,添加饵料;易造成赤潮或浒苔污染	藻类、贝类、鱼、虾、龟等养殖	[34-35]
传统农业、畜牧业 Traditional agriculture and husbandary	完全不使用石化物质;养分循环,但产量低	主粮、杂粮、蔬菜、肉、蛋、奶生产	[36]
生态农业 Eco-agriculture	基本不用石化物质;养分循环和生物多样性保护	主粮、天然捕捞、草原与森林食物	[4, 27, 37-39]
有机农业 Organic agriculture	需要专门机构认证的农业;基本不使用石化物质,但允许反季节种植	以蔬菜为主,含少量主粮、茶叶或果园	[40]

设施农业是一类人工控制环境的农业模式,属高投入、高污染,资金、技术、劳动力密集型的农业模式。利用人工建造的设施,使传统农业摆脱自然束缚,实现工厂化生产。此农业模式打破了传统农业的季节性,实现农产品反季节供应<sup>[30-31]</sup>。

设施农业包括设施园艺和设施养殖两大部分,前者是遍布世界各地的温室蔬菜大棚,其中中国占85%以上;后者即集约化养殖场。设施养殖主要有水产养殖和畜牧养殖两大类,其中水产养殖包括淡水养殖与海水养殖;畜牧养殖包括集约化养

殖牛、羊、猪、鸡、鹅、鸭等,其中鹅和鸭等水禽类养殖在狭小的空间实现。设施农业中还分化出一种特殊类型,即不用土壤而用可吸收溶液养分的物料(如珍珠岩、蛭石、无毒泡沫塑料等)作为植物生长介质的栽培模式,这种不用土壤、不占耕地,通过营养成分有效供给,满足植物生长的技术,被誉为人类种植历史上的一次“大变革”,也称为“植物工厂”<sup>[32]</sup>。无土栽培不仅不受季节的限制,生长快、产量高,而且把农民从繁重的种植劳动中解放出来,实现植物生产的工厂化、自动化,持续为人们提供更多的食品。常用的无土栽培技术有水培、雾(气)培、基质栽培等。该类农业模式也是典型的数量型农业,其带来的环境与健康问题尚未引起足够重视。

住宅农业是农户或市民在自家居住地发展起来的小型农业模式,该技术可以不用农药、化肥、除草剂、地膜、激素而生产优质蔬菜或瓜果。消费者亲自参与农业劳动解决农药残留问题。农户住宅绝大多数以一层的庭院为主,土地利用效率相对较低。城市屋顶与阳台也可发展为安全的蔬菜生产空间,屋顶农业可增加水利用效率,将生活垃圾无害化处理,同时可生产有机食物。另外,住宅农业还可降低市政污水管网压力,增加小区绿地面积。然而,住宅农业通常面积较小,仅可部分满足消费者对优质蔬菜需求。

白色农业是利用微生物资源生产食物,该模式既包括真菌生产,还包括生物工程、发酵工程和酶工程<sup>[33]</sup>。因微生物不需要光线,不能进行光合作用,且蘑菇产品为白色,故得名。另外,白色农业生产环境高度洁净,工人需穿戴白色工作服,故被形象化地称之为“白色农业”。但白色农业易发生“白色污染”。

蓝色农业是在海洋水体中开展的水产农牧化活动,是以海洋为生产场所的农业,包括在近岸浅海海域、潮间带以及潮上带室内外水池水槽内,所开展的海藻、虾、贝、鱼类的养殖等。在水生环境中,单位面积上水生植物光合能力高于陆地,且易于收获,因此水环境被认为是食物生长的理想之地<sup>[34-35]</sup>。海洋是巨大的资源宝库,开发利用海洋生物资源,可为人类提供大量食物,并为海洋保健品、海洋药物、海洋化工提供丰富的原料。传统农业和畜牧业是除集约化种植和养殖以外的农业、畜牧

业,其中种植业不使用农药化肥,以满足农民自身需求为主,极少量产品进入市场流通;传统畜牧业又分为种草养畜、天然放牧和生态草业3种形态,其中生态草业包含部分生态农业内涵<sup>[36]</sup>。传统渔业包括淡水渔业与海洋捕捞渔业,不包括集约化水产养殖。

生态农业是利用生态学原理设计的农业产业模式,多数学者对该种模式十分推崇,并寄予厚望<sup>[4, 27, 37-39]</sup>。骆世明<sup>[27]</sup>分别从景观、群落、种群、个体与基因层次划分了景观、循环、立体、食物链、物种与品种搭配、复合等生态农业模式。

有机农业是通过第三方有机认证的农业模式,理论上要求不使用人工合成的化学物质、不用转基因种子,但对反季节种植和集约化养殖没有特殊要求,地膜和除草布也允许使用。一般认为有机农业产量低于常规农业,但可通过多种农业形态弥补,如生物多样性与废弃物的循环利用。另外,有机农产品售价高于普通农产品,可吸引更多的农户开展有机生产<sup>[40]</sup>。

其他农业形态包括农林复合体、订单农业等。

## 2 现代生态农业是环保型与健康型农业

现代农业严重依赖人工合成化学物质,生物技术应用依然在化石资源利用基础上做文章,不能从根本上减少污染。农业生态系统的多样性决定其稳定性,其中劳动力去向非常关键。如用除草剂替代人工锄草,其后果就是促进杂草进化,为消灭杂草,就需要喷洒更多更毒的除草剂,作物质量就会受到影响;抗除草剂转基因作物,虽然不受除草剂影响,但喷洒除草剂数量和剂量均增加,最终导致超级杂草出现,除草剂也会进入食物链。使用大量农药不仅灭杀了害虫,还会误杀益鸟益虫,更严重的是,害虫也对农药产生抗性。大量化学物质污染人类食物链,食品中抗生素、重金属、激素含量升高,消费者为此付出沉重的健康代价。我国人多地少,有悠久的农业历史,适合发展生态农业。

生态农业具有如下优点:

第一,化肥用量大幅度减少。生态农业可使用少量化肥,但化肥利用效率高、用量少,基本不造成环境污染。生态农业强调元素循环,被收获物带走的养分通过有机肥、绿肥或生物菌肥的方式补充回

来。发展生态农业,化肥用量在现有基础上可减少90%但不影响产量;发展严格的有机农业,产量能够维持甚至超过单一化农业<sup>[41]</sup>。

第二,农药用量大大减少甚至完全不用。农田中主要害虫和杂草都是自然界正常的物种,能够用物理方法控制害虫,尽量不用化学方法;能够恢复生态平衡,且对产量不造成明显影响,尽量减少人为干预,这样既节约人工成本,还保护农田生态环境。生态农业对害虫防控以预防为主,强调生态平衡,而不是害虫暴发后靠化学物质灭杀。在生态农业模式下,农药是备用品,仅作为应急品使用。研究表明,发展生态农业农药用量可在现有基础上减少70%~80%基本不影响产量<sup>[42]</sup>。

第三,消除农膜污染。在作物生长前期,使用农膜可提高地表温度、湿度兼有抑制杂草作用,但在后期农膜是有害的。农膜造成的主要问题表现在二噁英、微塑料<sup>[43]</sup>与塑化剂<sup>[44]</sup>污染,其中后两者可以直接进入人类食物链。随着全球气候变暖,植物生长季节延长,基本不需要使用农膜。生态农业可根据作物生长习性,在不使用农膜的前提下,保证产量与质量双赢,从源头杜绝二噁英等致毒物质向环境释放。

第四,生态农业是耕地固碳型的,可将碳排放逆转为碳吸收。目前全球约44%~57%的温室气体来自现代农业及其相关的工业活动<sup>[7]</sup>,有机肥替代化肥可显著减少温带农田温室气体排放量。研究发现,现代农业模式下,普通农田净释放温室气体以CO<sub>2</sub>当量计为2.7 t/(hm<sup>2</sup>·a),而生态农业净吸收温室气体以CO<sub>2</sub>当量计为8.8 t/(hm<sup>2</sup>·a),两者相加以CO<sub>2</sub>当量计为11.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[45]</sup>。停止或减少化肥使用,增加耕地有机质,可将温室气体埋藏到地下,土壤固碳是生态农业的附属功能。

第五,从源头解决人类健康退化问题。由于投入化学物质非常少,且尽量使用可降解生物类农药,再加上自然界自净能力,大量使用有机肥,所产出的农产品基本无农药残留,营养成分丰富,口感好,不存在缺素现象<sup>[46]</sup>。如果农产品中检测出多种农药残留,就不能称为生态农业。从源头杜绝有害化学物质如农药、重金属、抗生素等进入食物链,人体免疫力就会提高,重大疾病如癌症、白血病、不育不孕病、儿童性早熟等发生的概率就会大幅度下降。

第六,种养结合、种植多样化、间作套种和立体种植。生态农业肥料来自系统本身,“六畜兴旺”才能“五谷丰登”。在少量土地面积上,可以提供丰富的食物种类;豆科与禾本科植物间作套种,可以直接利用空气中的氮源。生态农业中,食物多样性高,这是其他农业方式所不能做到的。物种多样性丰富,生态系统就稳定,抗风险能力就高。据估计,在中国一个1 000人左右的村庄,可以提供的食物种类近200种。而美国的集约化农业模式,几百甚至几千平方千米内只能生产一两种食物,该模式无法做到间作套种,也做不到连茬种植,必须换茬轮作。

第七,单位土地经济效益高。由于采取粗放的化学法种植,集约化农业虽然产量相对高,但价格便宜,还会因产品滞销造成资源浪费。提高经济效益的办法有2种:一是继续扩大土地规模,使经营者有利可图,但质量会下降;二是提高产品质量,提高价位。生态农业采取的是第2种方式。

第八,发展生态农业可带动农民就业。由于优质优价,食物生产的生态环境天然、纯净、无化工污染,生态农产品对城市人群有很强的吸引力。农业要素容易变成商业要素,包括养殖、种植、收获、加工、销售、餐饮、观光旅游、养生、养老等。乡村可以就地城镇化,吸引农民或市民就业,因此,发展生态农业很有可能形成新的经济增长点。

### 3 生态农业概念与边界

学术界公认美国密苏里大学土壤学家William A. Abernethy于1970年首次提出“生态农业”这一概念<sup>[3]</sup>。在我国,“生态农业”概念是1982年在宁夏银川召开的全国生态经济学术研讨会上提出的<sup>[37]</sup>,随后马世俊<sup>[26, 38]</sup>、李文华<sup>[4]</sup>、骆世明<sup>[24, 27]</sup>等对生态农业的推介均有突出贡献。李文华等<sup>[4]</sup>认为生态农业作为一种现代化的农业发展模式,是以生态学和生态经济学原理为基础,综合运用现代管理手段和先进的科学技术手段作用于传统农业,以期获得较高的社会效益、经济效益和生态效益。

1991年,马世俊等<sup>[26]</sup>共同拟订了中国生态农业的基本概念,即:生态农业是指在经济和环境协调发展原则下,根据生态学、生态经济学、生物和物质循环再生的原理,总结吸收各种农业生产方式的成

功经验,应用生态系统工程方法建立和发展起来的、合理安排农业生产的、因地制宜的一类农业模式。他们认为这种农业生产是无机农业和有机农业的有机结合,利用生态学原则管理和建立一个生态上能自我维持、低输入的、经济上可行的农业生态系统。生态农业主要依靠农业生态系统的良性循环来发展农业,这是一种低能耗农业,充分利用太阳能和生物资源,尽可能少的投入能源、化肥和农药,获得尽可能多的食物。另外,农工贸一体化、产供销一体化,可有助于实现农业增产、生态环境保护、能源节约和再生利用,实现社会效益和经济效益双赢,生产和环境保护协调发展,为推动农业生产的现代化发展开辟新的前景。

然而,这个概念主要存在4个问题:一是原则较多,包括系统理论、生态学理论、综合运用、因地制宜、规划进行、生态学经济原则等;二是条件较多,如在一定区域内、主要依靠太阳能和生物质能、尽可能少的、尽可能多的、较为理想的等;三是笼统,如有机和无机如何进行结合没有说清,经济可行性较弱;四是没有明确说明生态农业特点,即杜绝化学农药等有害化学物质,发挥农业环境保护与健康功能,生产的食品健康,经济效益明显高于常规农业等。至于生态农业的副功能,如在能源节约与再生利用,社会效益与经济效益提高等方面,发展生态农业就能做到,不必刻意强调。综上,传统的生态农业概念已经不适应时代的发展,尤其对生态农业产业的发展,缺乏具体的科学指导意义。

针对上述问题,本研究提出生态农业的概念:生态农业是利用生态学原理设计的新型农业产业模式,在种植或养殖全过程中,不使用化肥、农药、除草剂、地膜、激素与转基因种子(六不用)或仅使用少量化肥(五不用)。这2种农业模式的要求高于目前公认的有机标准和绿色标准,其中对农药残留的要求是不得检出。

长期发展生态农业,耕地生产力不断提高,生产出的食物为绿色食物(使用少量化肥,不使用其他化学物质)或有机食物(化肥也不使用),其价位在市场上通常高于常规农产品。生态农业并不是落后、低产、低效的代名词,而具有十分明显的生态、社会与经济效益。生态农业是在传统农业智慧基础上,利用现代生态学原理和技术提升的环境友

好型农业<sup>[39-40]</sup>。

生态农业的首要任务是为人类提供足够的食物。生态农业的边界是:凡是符合生态学原理,完全不用(有机农业)或极少量使用(绿色农业)有害化学物质的农业生产方式,都属于生态农业的范畴。该观点与侯学煜提出的“大农业”“大粮食”<sup>[25]</sup>观点有异曲同工之处。有机或绿色种植,海洋自然捕捞、天然淡水渔业,草原自由放牧,森林食物采集,农牧区生态空间自由放养动物,不使用农药、激素、地膜、转基因种植蔬菜,中草药、茶、水果等生产、加工与销售等,均属生态农业范畴。

严重违背生态学规律的农业模式,不属于生态农业,如工厂化养殖,集约化与规模化单一种植,反季节种植,使用大量化学物质投入或转基因种子的农业,使用大量食品添加剂的加工业,仅有认证证书而食品来源于农贸市场的假有机农业或假绿色农业,检测出多种农药残留的所谓“无公害”农业,高密度水生养殖业等。

需要指出的是,生态农业并不能解决所有的问题,其应用程度取决于消费者观念改变、生产者参与和政府支持;其缺点是投入劳动力多,且比较辛苦。因此,有必要开发生态科学技术,减少劳动力投入,如用机械播种与收获、机械除草等。发达国家化学化农田生产的粮食多用于出口、做饲料或工业原料,而生态农业既要满足健康需求,还要保护生态环境与生物多样性。

## 4 现代生态农业的科学原理与应用技术

### 4.1 科学原理

#### 4.1.1 水热耦合原理

在农田中,光照、 $O_2$ 、 $CO_2$ 都不是限制因子,而是水热条件尤其水热组合,决定了农业生产力高低。生态农业尽可能利用天然降水,并适度利用客水或地下水,做到“早能浇、涝能排”。热即热量,地球上的一切热量来自太阳,热对植物生长发育乃至群落分布有重要的作用。在阳光充足地区,热量与水的耦合对农业增产的作用大于化学肥料。此外,生态农业不仅考虑籽粒等人类可食部分,还考虑秸秆等动物可食部分。因此,在基本无有害化学物质添加基础上,获得较高的生物量是生态农业考虑的重点,而维持合理的水热平衡

非常关键。

#### 4.1.2 土壤碳氮库增长原理

碳表现在土壤中即有机质,通过有机肥养地,可大幅度提高土壤含碳量。有机肥指自然界中的所有光合产物及其衍生物,不仅仅指人粪尿和动物排泄物<sup>[47]</sup>。氮是植物光合生长必需的元素,自然界可以利用的氮均来自空气,生物固氮、雷电固氮、干湿沉降都可以提供氮源。在种植过程中,培育土壤氮库,即使离开化肥厂也能给作物提供足够多的氮。

#### 4.1.3 生物多样性原理

农田生物多样性包括种植物种(植物、菌物)与养殖物种(动物)多样性。农业生态系统物种多样性越高,稳定性也越高,抗自然灾害能力越强,同时可延长农产品货架期,避免农产品滞销。害虫与杂草本身就是自然界的物种,其作用也具有利弊两面性。对于害虫和杂草必须进行管理,避害就利。在管理过程中,农民付出的劳动力获得工资性回报,从而带动生态就业。

#### 4.1.4 生态位原理

农田生态系统中,不同物种都有自己的生态位,在时间、空间上所占据位置不同,大部分时间物种相安无事,只有当生态位重叠时,才会发生激烈的对抗。在农田中,因种间竞争,一种生物不可能利用其全部原始生态位,所占据的只是现实生态位,因此利用生态位的空间差异,可以降低杂草控制成本,如果园生草,就是利用乔木(藤本)与草本植物不同的空间生态位;种植高粱、甘蔗、玉米等高秆作物也可限制杂草生长;利用时间生态位差异,使用诱虫灯捕杀夜行性害虫,益虫多在白天活动而较少受害。

#### 4.1.5 生态系统原理

生态系统是不同生物与环境之间形成的相互依赖、相互制约的结构与功能单位,并在一定时期内处于相对稳定的动态平衡状态。根据农田生态因子变化特点、物种组成及其相关关系,利用生态学知识进行农田生态系统设计,力求获得最大产量、生物量或者最高经济效益。如间作套种、林禽互作、果禽互作、林粮互作、药粮互作、稻田养鸭、稻田养鱼、莲鱼共生、鱼菜共生等。

### 4.2 主要应用技术

关于生态农业的技术体系,骆世明<sup>[27]</sup>认为构

成生态农业技术体系的单项技术来源广泛,包括传统农业、现代农业和高新科技,其技术体系依然停留在农业的生产方面,然而农业的根本问题不是产量,而是农民收入。因此,生态农业技术体系必须包括农产品从生产到销售的各个环节。从小范围实践成功案例来看,完全不用化肥农药等能够产生出足够的食物来满足人类可持续生存<sup>[41]</sup>。生态农业并不落后、低产、低效,而是高效、高产、高附加值。生态农业除使用机械、电力和燃油外,其余石化类农资已基本停用,主要的投入是劳动力。在目前资本市场下,劳动力就是金钱,是最安全的生物力。生态农业需要多种环境友好的科学技术,具体包括以下5个方面:

1)物理+生物防虫技术。利用害虫的趋光特点吸引害虫进行诱捕,同时恢复天敌控制害虫<sup>[42]</sup>。该技术从源头控制雌虫数量,将交配后的雌虫连同雄虫通过物理方法控制,阻碍雌虫回到土地产卵,减少后代数量,再加上天敌恢复,害虫不至于产生危害。

2)有机肥养地技术。地球上所有的光合产物及其衍生物均可以做肥料,包括植物枯落物、秸秆、人与动物排泄物、动植物遗体、农产品加工与菌类养殖废弃物、可降解生活垃圾等。持续投入动物肥、绿肥、杂草肥等生物质肥料,可实现耕地碳库与氮库双增加,产量得到维持或提高。

3)生物与机械控草技术。采用生物、机械、人工等方法,根据时间生态位进行除草,或利用空间生态位生草,或利用动物除草;充分利用各种机械除草。

4)生物控病技术。充分发挥物种尤其有益微生物的作用,保持粮食作物、蔬菜、果树不生病或少生病,从源头停止各种农药使用。该技术与有机肥养地技术配合,会发挥更重要的作用。

5)动力与灌溉技术。为降低劳动强度,收获、储存、运输、灌溉等尽量采取机械措施。目前,大型设备可用作整地、耕地和中耕除草,自动喷灌设备可布局到田间地头,从而大幅度降低劳动强度。

上述技术均应用在生产阶段,提供的是初级农产品,没有实现农产品增值,农民会因效益低选择进城打工。因此,有必要提高农产品附加值,让农民有定价权,畅通销路,才能保证生态农业健康发展。因此,现代生态农业还需要以下技术:

1)农产品加工技术。利用物理或生态方法替代有害化学添加剂,进行农产品加工,提升农产品附加值。农产品加工应以小型化、家庭化、多元化为主,带动农民专业化分工,更大范围内就业,避免市场竞争风险。传统的食品加工工艺,在高效生态农业体系中将发挥巨大的作用。

2)互联网技术。现代生态农业必须有自己的定价权,要发挥互联网与物联网优势,线上与线下相结合,网上购买与现场体验相结合,将优质农产品以优质价格销售出去。

3)物流技术。该技术可让自然界中所有适合人类食用的生物质进入餐桌。收获或捕捞的各种自然来源(如海洋、草原、森林、湿地、荒漠等)食物都属于生态农业范畴,且属于有机食品。

## 5 生态农业实践:以弘毅生态农场为例

应用上述生态农业的科学原理与应用技术,笔者于2006年7月18日在山东省平邑县蒋家庄建立了弘毅生态农场。弘毅生态农场占地33.3 hm<sup>2</sup>,其核心思路是充分利用生态学原理,而非单一技术提升农业生态系统生产力,恢复优美的农业生态环境。农场完全摒弃化肥、农药、除草剂、农膜、激素和转基因6项不可持续技术,从秸秆、害虫和杂草综合开发利用入手,种养结合,实现元素循环与能量流动,生产纯正有机食品,以市场带动乡村生态环境保护<sup>[41]</sup>。

采用自主研发的青贮饲料生产工艺,弘毅生态农场可年产青贮饲料1500 t,六不用有机主粮500 t,优质肉牛300头。用青贮饲料喂养的肉牛肉质好、生长速度快、抗病力强。通过对秸秆的有效利用和牛粪还田实现了耕地固碳和减少温室气体排放的生态循环目标。农场建立18年来,带动当地农民就业20人,增加了农民收入,杜绝了5个村秸秆焚烧现象。弘毅生态农场采取的主要技术措施如下:

1)害虫控制技术。预防为主,恢复生态平衡。采取物理+生物方法控制虫害,逐步乃至彻底告别农药,从源头解决农药残留问题。

2)分室青贮技术。大面积焚烧秸秆,既污染大气,又浪费资源,增加雾霾。引入大型反刍动物,采用面包草加工技术、普通青贮技术和大型遮雨式分室青贮技术,将秸秆变成动物的“粮食”,向秸秆

要“粮”。

3)有机农田综合增产技术。采取深翻碎土、有机肥还田<sup>[48-49]</sup>、合理灌溉、养禽除草、物理+生物防虫等综合措施,成功将低产田改造成高产稳产的“吨粮田”<sup>[41]</sup>。该技术有助于提高土地的综合利用效率,养活更多人口。

4)林禽互作技术。本技术重点解决笼养鸡空间狭小问题,为禽类(鸡、鸭、鹅等)寻找自由生长空间。除边疆草原外,内地丰产林下的空间也是养禽理想之地。主要做法是在林下空间自由放养,并常规防疫,或补充昆虫和蚯蚓活食增强禽类抵抗力等。

5)有机果园综合管理技术。采取壁蜂授粉、有机肥肥田、恢复土壤生物多样性、波尔多液防病害、添加钙肥、种植豆科牧草压制杂草、秸秆覆盖替代地膜、沼液控蚜虫等办法,使有机果园产量保持在普通果园的80%~90%,从源头上解决水果农药残留与环境污染问题<sup>[50]</sup>。

6)有机堆肥技术。充分利用一切农业生态要素,让元素循环起来。采取简单堆沤、生物菌肥堆沤、含磷矿石堆沤、绿肥堆沤等方式补充土壤营养。

7)杂草综合防治。采取种源切断、生态位占领、旱季人工除草、机械除草、养禽除草、生物菌肥提苗、与草共生、果园生草等方法寻找农业杂草的综合防治办法。

弘毅生态农场的六不用产品已畅销中国除香港、澳门、台湾外的所有省、市、自治区,受到北京、上海、广州、深圳等大城市市民欢迎。目前已有城市消费会员12516人,且以每月100~150人的速度增加。长期会员前6位的省市组成情况:北京占18.7%,广东占10.9%,山东占9.9%,上海占6.4%,浙江占6.1%,江苏占6.0%。

弘毅生态农场案例表明,在不破坏生态环境和生物多样性前提下,生态农业能够生产足够多的食物满足社会需求;由城市消费带动农业产业发展,可同步解决食品安全、环境保护与健康保护等多种问题。

## 6 结 语

现代农业造成严重环境污染问题,并带来人类健康隐患,导致气候变化与物种消失等生态灾难。利用百年以上的生态学科学知识,人类已实现基本



不用农药化肥等化学物质生产足够的食物。生态农业附加值高,可以带动农牧民增收。生态农业是一类健康保障型与环境保护型的农业,其利用的科学原理与技术与现代农业有较大区别,生态农产品不含农药、激素、重金属、抗生素、塑化剂、微塑料等残留,食物营养和口感与现代农产品具有明显差异。发展生态农业能够大幅度提高农产品附加值,增强农产品竞争力,让农民实现家门口就业,从源头减少面源污染,遏制温室气体排放,保护生物多样性。建议国家采取必要的措施发展无农药残留、高附加值的生态农业,实现城乡之间、人与自然之间的和谐共生。

## 参考文献 References

- [1] Pingali P L. Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(31): 12302-12308
- [2] Fedoroff N V, Battisti D S, Beachy R N, Cooper P J M, Fischhoff D A, Hodges C N, Knauf V C, Lobell D, Mazur B J, Molden D, Reynolds M P, Ronald P C, Rosegrant M W, Sanchez P A, Vonshak A, Zhu J K. Radically rethinking agriculture for the 21st century[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 833-834
- [3] Altieri M A, Farrell J G, Hecht S B. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*[M]. 2nd ed. Boulder: Westview Press, 1996
- [4] 李文华,刘某承,闵庆文. 中国生态农业的发展与展望[J]. *资源科学*, 2010, 32(6): 1015-1021
- Li W H, Liu M C, Min Q W. Progress and perspectives of China's ecological agriculture[J]. *Resource Science*, 2010, 32(6): 1015-1021 (in Chinese)
- [5] Reganold J P, Wachter J M. Organic agriculture in the twenty-first century[J/OL]. *Nature Plants*, (2016-02-03). DOI: 10.1038/nplants.2015.221
- [6] Sims R. Energy-smart food for people and climate[EB/OL]. (2011-02-18), <http://www.fao.org/docrep/014/i2454e/i2454e00.pdf>.
- [7] Tubiello F N, Salvatore M, Golec R D C, Ferrara A, Rossi S, Biancalani R, Federici S, Jacobs H, Flamini A. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990-2011 analysis[EB/OL]. [2023-12-02]. <https://www.fao.org/3/i245e/i2454e00.pdf>
- [8] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020
- National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese)
- [9] 蒋高明. 乡村振兴: 选择与实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2019
- Jiang G M. *Vitalization of Rural Areas: The Creative Outlet of Prosperity*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019 (in Chinese)
- [10] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010
- [11] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, Sinclair K, Kurz D, Mcnair M, Crist S, Shpritz L, Fitton L, Saffouri R, Blair R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995, 267(5201): 1117-1123
- [12] Zhang W J, Jiang F B, Ou J F. Global pesticide consumption and pollution: With China as a focus[J]. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 1(2): 125-144
- [13] Liu E K, He W Q, Yan C R. 'White revolution' to 'white pollution': Agricultural plastic film mulch in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 1-3
- [14] Davis D R, Epp M D, Riordan H D. Changes in USDA food composition data for 43 garden crops, 1950 to 1999[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2004, 23(6): 669-682
- [15] Gruber K. Re-igniting the green revolution with wild crops[J/OL]. *Nature Plants*, (2016-04-05). DOI:10.1038/nplants.2016.48
- [16] Burchi F, Fanzo J, Frison E. The role of food and nutrition system approaches in tackling hidden hunger[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(2): 358-373
- [17] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 353-364
- [18] Diaz J R, Cagigas A D L, Rodriguez R. Micronutrient deficiencies in developing and affluent countries[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 57(S1): 70-72
- [19] Bouchard M F, Chevrier J, Harley K G, Kogut K, Vedar M, Calderon N, Trujillo C, Johnson C, Bradman A, Barr D B, Eskenazi B. Prenatal exposure to organophosphate pesticides and IQ in 7-year-old children[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(8): 1189-1195
- [20] Betarbet R, Sherer T B, MacKenzie G, Garcia-Osuna M, Panov A V, Greenamyre J T. Chronic systemic pesticide exposure reproduces features of Parkinson's disease[J]. *Nature Neuroscience*, 2000, 3(12): 1301-1306.
- [21] Weichenthal S, Moase C, Chan P. A review of pesticide exposure and cancer incidence in the agricultural health study cohort[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(8): 1117-1125
- [22] Mark M V D, Brouwer M, Kromhout H, Nijssen P, Huss A, Vermeulen R. Is pesticide use related to Parkinson disease? Some clues to heterogeneity in study results[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(3): 340-347
- [23] 石山. 发展中的中国生态农业[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001
- Shi S. *Developing Eco-agriculture in China* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001 (in Chinese)
- [24] 骆世明. 论生态农业模式的基本类型[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 405-409
- Luo S M. Fundamental classification of eco-agricultural models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2009, 17(3): 405-409 (in Chinese)
- [25] 侯学煜. 生态学与大农业发展[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1984
- Hou X Y. *Ecology and Agricultural Development* [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1984 (in Chinese)
- [26] 胡涛, 齐晔, 孙鸿良. 中国生态农业四十年: 回顾与展望-纪念生态农业倡导者马世俊先生逝世30周年[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(12): 2107-2115
- Hu T, Qi Y, Sun H L. Forty years of China's eco-agriculture: Looking back and looking forward-To commemorate the 30th anniversary of Professor Ma Shijun's death, the founder and promoter of eco-

- agriculture concept [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 29(12): 2107-2115 (in Chinese)
- [27] 骆世明. 论生态农业的技术体系[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 453-457
- Luo S M. On the technical package for eco-agriculture [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 453-457 (in Chinese)
- [28] 程序. 可持续农业的几个理论问题[J]. *生态农业研究*, 1999, 7(1): 14-18
- Cheng X. Several theoretical problems in sustainable agriculture[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1999, 7(1): 14-18
- [29] 中华人民共和国农业农村部. 关于推进生态农场建设的指导意见[EB/OL]. (2022-01-28). [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202202/t20220209\\_6388306.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202202/t20220209_6388306.htm)
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Guiding opinions on promoting the construction of eco-farms[EB/OL]. (2022-01-28). [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202202/t20220209\\_6388306.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202202/t20220209_6388306.htm)(in Chinese)
- [30] 孙锦, 高洪波, 田婧, 王军伟, 杜长霞, 郭世荣. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(4): 594-604
- Sun J, Gao H B, Tian J, Wang J W, Du C X, Guo S R. Development status and trends of protected horticulture in China [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(4): 594-604(in Chinese)
- [31] 徐茂, 邓睿. 国内外设施农业发展的比较[J]. *北京农学院学报*, 29(2): 74-78
- Xu M, Deng R. A comparative research on the facility agriculture development at home and broad [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, 29(2): 74-78 (in Chinese)
- [32] 杨其长. 植物工厂[M]. 北京:清华大学出版社, 2019
- Yang Q C. *Plant Factory*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019 (in Chinese)
- [33] 吕爱清, 刘桂华. 浅谈微生物农业[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3): 139-141
- Lv A Q, Liu G H. Analysis of microbial agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(3): 139-141(in Chinese)
- [34] 张正斌, 刘孟雨, 钟冠昌, 张建华, 袁萍. 21世纪蓝色革命的崛起[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 18-23
- Zhang Z B, Liu M Y, Zhong G C, Zhang J H, Yuan P. Abrupt rise of blue revolution in the 21st century [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(4): 18-23 (in Chinese)
- [35] 张福绥. 21世纪我国的蓝色农业[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(12): 21-28
- Zhang F S. Blue agriculture of China in 21st century [J]. *Chinese Engineering Science*, 2000, 2(12): 21-28 (in Chinese)
- [36] 蒋高明, 吴光磊, 程达, 郑延海, 刘美珍, 李彩虹. 生态草业的特色产业体系与设计:以正蓝旗为例[J]. *科学通报*, 2016, 61(2): 224-230
- Jiang G M, Wu G L, Cheng D, Zheng Y H, Liu M Z, Li C H. Characteristics and designing of eco-husbandry system: A case study in Zhenglan Banner, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 224-230(in Chinese)
- [37] 叶谦吉. 生态农业[J]. *农业经济问题*. 1982(11): 1-9
- Ye Q J. Ecological agriculture [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 1982(11): 1-9 (in Chinese)
- [38] 马世骏, 李松华. 中国的农业生态工程[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- Ma S J, Li S H. *Agricultural Ecological Engineering in China* [M]. Beijing: Science Press, 1987(in Chinese)
- [39] 陶思明. 中国的生态农业及其发展[J]. *生态农业研究*, 1993, 1(2): 1-5
- Tao S M. The ecological agriculture and its development in China [J]. *Eco-Agriculture Research*, 1993, 1(2): 1-5 (in Chinese)
- [40] Niggli U, Wang-Müller Q Y, Willer H, Fuchs J. Innovation in agroecological and organic farming systems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3): 423-430
- [41] 蒋高明, 郑延海, 吴光磊, 刘慧, 池云花, 冯素飞, 李勇, 李彩虹, 李宗奉, 苏本营, 董群, 乌云塔娜, Lucas M, Lefort Z, Regolini M, 曾祥伟, 贺新华, 郭立月, 战丽杰, 唐海龙, 韦继光, 周平, 曾彦, 杨煜, 宋守宽, 刘秀, 甄珍, 刘海涛, 孟杰, 李静, 李霄, 李占, 丁娜, 博文静, 虞晓凡, 程达, 梁啸天, 李立君, 徐磊, 谷仙, 宋彦洁, Muminov A M, 刘滨扬, 赫晓霞, 刘美珍, 宁堂原, 王空军, 徐玉新, 陈文浩. 产量与经济效益共赢的高效生态农业模式: 以弘毅生态农场为例[J]. *科学通报*, 2017, 62(4): 289-297
- Jiang G M, Zheng Y H, Wu G L, Liu H, Chi Y H, Feng S F, Li Y, Li C H, Li Z F, Su B Y, Dong Q, Wuyun T N, Lucas M, lefort Z, Regolini M, Zeng X W, He X H, Guo L Y, Zhan L J, Tang H L, Wei J G, Zhou P, Zeng Y, Yang Y, Song S K, Liu X, Zhen Z, Liu H T, Meng J, Li J, Li X, Li Z, Ding N, Bo W J, Yu X F, Cheng D, Liang X T, Li L J, Xu L, Gu X, Song Y J, Muminov A M, Liu B Y, He X X, Liu M Z, Ning T Y, Wang K J, Xu Y X, Chen W H. High efficiency eco-agriculture model obtain both larger yield and economic benefit: A case study in Hongyi Organic Farm [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(4): 289-297 (in Chinese)
- [42] Guo L Y, Muminov M A, Wu G L, Liang X T, Li C H, Meng J, Li L J, Cheng D, Song Y J, Gu X, Zhao J S, Jiang G M. Large reductions in pesticides made possible by use of an insect-trapping lamp: A case study in a winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74(7): 1728-1735
- [43] 汤庆峰, 高峡, 李琴梅, 高丽娟, 张裕祥, 邵鹏, 陈啟荣. 农田土壤微塑料污染研究现状与问题思考[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(15): 72-78, 84
- Tang Q F, Gao X, Li Q M, Gao L J, Zhang Y X, Shao P, Chen Q R. Research status and existing problems of microplastic pollution in farmland soil [J]. *Journal of Anhui Agriculture Sciences*, 2021, 49(15): 72-78, 84 (in Chinese)
- [44] Zhang Q Q, Machine Z R, Cai Y Y, Li H R, Ying G G. Agricultural plastic pollution in China: Generation of plastic debris and emission of phthalic acid esters from agricultural films[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(18): 12459-12470
- [45] Liu H T, Li J, Li X, Zheng Y H, Feng S F, Jiang G M. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 598-606
- [46] Yu X F, Guo L Y, Jiang G M, Song Y J, Muminov M A. Advances of organic products over conventional productions with respect to nutritional quality and food security[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 53-60
- [47] Cui X H, Guo L Y, Li C H, Liu M Z, Wu G L, Jiang G M. The total biomass nitrogen reservoir and its potential of replacing chemical fertilizers in China [J/OL]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2020-08-25). DOI: 10.1016/j.rser.2020.110215
- [48] Wang L, Qin T Y, Zhao J S, Zhang Y C, Wu Z Y, Cui X H, Zhou G F, Li C H, Guo L Y, Jiang G M. Exploring the nitrogen reservoir of biodegradable household garbage and its potential in replacing synthetic nitrogen fertilizers in China [J/OL]. *Peer J*, (2022-01-18). DOI: 10.7717/peerj.12621
- [49] Wang L, Zhou G F, Qin T Y, Guo L Y, Li C H, Liu M Z, Jiang G M. Innovatively treat rural food waste through producing organic grains[J].

*Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29  
(55): 83483-83495

organic vineyard [J/OL]. *Agriculture*, (2022-10-23). DOI: 10.3390/  
agriculture12111751

[50] Qin T Y, Wang L, Zhao J S, Zhou G F, Li C H, Guo L Y, Jiang G M.  
Effects of straw mulching thickness on the soil health in a temperate

责任编辑: 申青苗



**第一作者简介:** 蒋高明,中国科学院植物研究所研究员、中国科学院大学教授、山东省人民政府泰山学者特聘教授,联合国大学干旱区问题咨询专家、《植物生态学报》副主编、《生态学报》《生命世界》《首都食品与医药》编委,曾任联合国教科文组织人与生物圈中国国家委员会副秘书长、中国生物多样性保护与绿色发展基金会副秘书长、中国生态学会副秘书长等。长期从事植物生态学与生态农业理论与实践研究。在退化生态系统修复中首次提出自然恢复理论,并在实践中大面积应用。