



•综述•

中国农业生态系统多样性保护研究现状与展望

廖美哲¹, 张宗文^{2,3}, 白可喻^{1,3*}

1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; 3. 国际生物多样性中心和国际热带农业中心联盟东亚办事处, 北京 100081

摘要: 面对气候变化、人口增长和农业集约化等一系列挑战, 如何推动农业可持续发展, 保障粮食安全, 农业生态系统多样性以其独特的遗传、生态和传统社会文化价值成为解决这一难题的重要出路。全面了解农业生态系统多样性的特性、主要影响因素、保护利用措施和研究手段将对制定农业生态系统多样性保护策略具有重要的参考价值。本文研究内容只涉及农业即种植业不是大农业。本文系统分析了各类影响因子和管理措施对农业生态系统多样性的影响, 介绍了我国农业生态系统多样性典型生态区域的现状和变化动态, 系统阐述了农业生态系统多样性的评估方法, 分析了农业生态系统多样性保护和管理的措施, 并据此指出我国目前农业生态系统多样性研究的主要问题和今后的展望。分析发现, 农业生态系统多样性在维持农业生态服务功能、提高农业生态系统的可恢复力、减少化肥农药污染和发展绿色农业方面发挥着重要的作用。从目前的研究和保护利用情况看, 需要完善农业生态系统多样性的评估指标和方法, 加强农业生态系统多样性的管理政策和协调机制, 加大农业生态系统多样性保护和利用力度, 使农业生态系统多样性保护和利用成为主流化。

关键词: 农业生态系统多样性; 绿色农业发展; 生态系统多样性评估; InVEST模型; 农业生态系统多样性保护

廖美哲, 张宗文, 白可喻 (2023) 中国农业生态系统多样性保护研究现状和展望. 生物多样性, 31, 23017. doi: 10.17520/biods.2023017.

Liao MZ, Zhang ZW, Bai KY (2023) Situation and prospects of biodiversity of agricultural ecosystem conservation and utilization in China. Biodiversity Science, 31, 23017. doi: 10.17520/biods.2023017.

Situation and prospects of biodiversity of agricultural ecosystem conservation and utilization in China

Meizhe Liao¹, Zongwen Zhang^{2,3}, Keyu Bai^{1,3*}

1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

3 East Asia Office of Alliance of Biodiversity International and International Center for Tropical Agriculture, Beijing 100081

ABSTRACT

Background & Aims: In the face of a series of challenges such as climate change, population growth and agricultural intensification, how to promote sustainable agricultural development and ensure food security, agroecosystem diversity with its unique genetic, ecological and traditional socio-cultural values become an important way to solve this challenge. A comprehensive understanding of the characteristics of agroecosystem diversity, the main influencing factors, conservation and utilization measures and research tools will be an important reference for the developing of agrobiodiversity conservation strategies.

Method: This paper only focused on agrobiodiversity on farming system not broad agriculture. We systematically analyzed the impact of various influencing factors and management measures on agroecosystem diversity, introduced the current situation and changing dynamics of typical ecological regions of agrobiodiversity in China, systematically described the assessment methods of agroecosystem diversity, analyzed the conservation and management of agroecosystem diversity, and accordingly pointed out the main problems of current agrobiodiversity research in China and future prospects.

Results: The analysis shows that agroecosystem diversity plays an important role in maintaining agroecological services,

收稿日期: 2023-01-19; 接受日期: 2023-04-01

基金项目: 国际合作国际生物多样性中心项目(L21ROM180)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: baikeyu@caas.cn

improving the resilience of agroecosystems, reducing chemical fertilizer and pesticide and developing green agriculture.

Prospect: There is a need to improve agroecosystem diversity assessment indicators, strengthen agroecosystem diversity management policies and coordination mechanisms, and intensify agroecosystem diversity conservation and use, so that agrobiodiversity conservation and utilization can be mainstreamed in sustainable agriculture development.

Key words: biodiversity of agricultural ecosystem; green agricultural development; ecosystem biodiversity assessment; InVEST model; agrobiodiversity conservation

农业生态系统多样性是农业生物多样性的的重要组成部分,支撑着粮食生产系统的稳定和农业可持续发展。气候急剧变化、人口持续增长以及全球对粮食需求的不断增加,带来了生态环境恶化等问题。通过提高农业生态系统韧性来稳定提高粮食产能,成为未来可持续发展模式下保护粮食安全、维护社会稳定的重要途径(Tscharntke et al, 2012; Bommarco et al, 2013)。农业生态系统多样性是由农用地、水资源、农业生物物种及其布局而形成的生产体系多样性,对人类的重要意义主要在于维系粮食生产系统的多样性,稳定其结构和功能,提升其韧性。越来越多的研究表明,生态系统多样性对我们的粮食产量、身体健康、居住环境甚至人身安全都具有举足轻重的重要性。同时农业生态系统多样性的维持为不同物种间的关系、因地制宜的土地利用和形成新的稳定的生态系统都提供了有利的条件(曾雄生, 2011)。作物品种多样性不仅是农业生态系统多样性的重要组成部分,也具有十分重要的生态价值,除了能供给稳定的农业粮食产能,还可提供各种生态系统服务,抵御外来物种入侵、服务生态旅游和生态教育,并打造生态品牌、提升绿色产业,是生态环境质量的重要指标,更是农业生态系统稳定性的保障(刘云慧等, 2021)。所以,在现代农业框架下,只有合理利用农业生态系统多样性才能构建稳定、可持续、健康、高产量的农业生态系统,并促进农业的可持续发展。

1 农业生态系统多样性的影响因素

保护和有效利用农业生态系统多样性、维持农业生态系统的稳定性需要了解影响农业生态系统多样性的主要因素,以期有关的决策提供有效的参考。

1.1 自然环境因素的影响

气候因子和地理因子等自然环境因素对农业生态系统多样性有基础性的影响。孙祥军(2012)研

究发现农田对自然环境的需求及其与环境因子之间的关系,对农业生态系统的发展极为重要。干旱少雨对旱地农业生态系统的影响较大,导致相关生态功能降低,作物产量下降;高温多雨、水热条件优越的情况下,农业生态系统多样性会更加丰富,相应的生态功能更强;在水域充足复杂的环境中,水域农业生态系统多样性会更加丰富;在地势复杂、地形起伏大的地理环境中,农业生态系统多样性也会更加丰富。其中农业生态系统多样性对气候变化相关的影响因子最为敏感,尤其是全球变暖、大气中CO₂浓度的升高和降水量的变化都很可能加大农业系统的压力,加快农业产量的下降(蔡运龙, 1996; 肖国举等, 2007)。农业生态系统本身也是属于比较脆弱的半自然生态系统,一些环境的变迁与突发事件会导致农业生态系统多样性飞速下降。例如突发的洪灾、旱灾都会严重影响农业生态系统的多样性。

1.2 农业生产方式的影响

农业生产方式属于人为干扰,不合理的农业生产方式会加速农业生态系统多样性的丧失(杨曙辉等, 2010)。农业生产主要包括种植制度、整地、施肥、播种、田间管理、收获等部分,其中种植制度又分为轮作、间作、套作和作物布局等,合理的农业生产方式是农业生产力提高的重要途径,同时也是影响农业生态系统多样性的重要因素(陈欣等, 1999)。农业生产方式中农田的套作、轮作会改善农田生物群落多样性,从而对农业生态系统多样性的提高起着直接的积极作用(罗益镇, 1995)。而不科学的耕作、不合理的施用肥料和农药则会给农业生态系统多样性带来消极的作用。不合理的调配农业生产活动方式,会导致农业生态系统多样性减弱。研究发现有机农业对农田内动物、植物、土壤动物与微生物的伤害小,可以有效维持农业生态系统多样性,增强农业生态系统韧性(王长永等, 2007)。不同农业生产方式对农田内的动植物、土壤动物和微生

物的多样化组成也会产生不一样的影响,而丰富的农业生态系统多样性有利于控制病虫害的发生、增强土壤肥力与生产力等。

1.3 农田管理的影响

1.3.1 外源输入的影响

农业生态系统属于一个半自然的复合生态系统。生物与其生境相互作用并进行物质交换与能量循环,外源碳输入可能会改变参与土壤碳氮循环相关的微生物的丰度,进而影响土壤呼吸,从而影响土壤碳氮循环和农业生态系统物种多样性的变化(Xue et al, 2016)。外源氮的输入不仅会影响土壤氮循环过程以及土壤氮库的相互转化和稳定性,还会引起反硝化作用和 N_2O 的排放进而影响农业生态系统物种多样性。在人工干预的情况下无论是哪一种元素外源输入过多,都会引起土壤生物多样性减少,并且对一些在农田里活动的动物、微生物的多样性也会产生明显的影响,加重污染物的环境效应,从而影响农业生态系统多样性(何亚婷等, 2010)。

1.3.2 集约型的生产方式及高产品种推广的影响

集约型的生产方式和高产品种的推广是提高农业生产效率的主要方式。自绿色革命之后,中国农业集约化程度不断提高,以抗旱、抗倒伏、高产量为特点的高产品种不断栽培成功,使中国农业产量创历史新高。然而,在大幅度提高农业产量的同时,并存许多风险与挑战,单一的品种种植过分依赖少数几个作物类型,会造成毁灭性病虫害的大面积暴发。遗传多样性低、遗传背景狭窄会导致农田生物多样性降低,农业生态系统脆弱性增加。因此提高农业生态系统内农作物的遗传多样性,从而增强农业生态系统的韧性和抗逆性能力,从而更好地保护农业生态系统多样性(唐建军和潘晓玲, 1997)。

1.3.3 农田景观结构的影响

农田景观结构是地区和景观水平上农业生态系统多样性格局的重要影响因子(Fahrig et al, 2011)。研究表明,较大尺度的景观结构可以影响占据空间上非连续生境斑块的种群集合体的动态演化和生物多样性(Gurr et al, 2003; 吕一河等, 2007; 傅伯杰, 2011)。所以农田景观结构对农业物种多样性与农业生态系统多样性的影响极为重要。例如20世纪80年代以来北京市郊区农田景观规模不断缩减,主要被城乡建设用地侵占,农田景观向着离散

化、破碎化的趋势演变,景观连通性低、生态廊道中断,导致农业生态系统多样性减弱,严重地破坏了大城市近郊区农田景观的稳定格局(赵婷婷等, 2009)。农田的种植结构组织的合理性,甚至是农田边缘的农田边界防护林结构配置的合理性,都会直接影响农业生态系统物种多样性和稳定性。

1.4 外来物种入侵的影响

外来入侵种对当地生态系统的物种多样性、遗传多样性、景观多样性具有全方面的影响(陈元胜, 2007)。随着经济全球化、国际贸易交流不断发展,中国进口的农产品贸易量也迅速增加。据农业农村部(www.cnafun.moa.gov.cn/kx/gn/202105/t20210515_6367778.html)资料显示,2020年我国农产品贸易额为2,468.3亿美元,同比有不断增加的趋势。与此同时,全国口岸截获检疫性有害生物数量和批次也明显增多。据统计,2020年截获有害生物59.08万种、检疫性有害生物6.51万种。在农田中,外来物种入侵时,当地农田生态系统缺乏足够的抵御能力,入侵物种在与当地物种的竞争中占据优势,导致原有物种衰退和消失,改变了农田生态系统结构,并严重影响当地农田生态系统的各项功能,使得原本农田物种数量不断减少甚至灭绝,最终导致当地农业生态系统单一和退化(陈兴, 2017)。

1.5 民族传统文化的影响

农业生态系统多样性丰富的地区,往往是文化多样性丰富的地区。民族传统文化也是影响农业生态系统多样性的重要因素之一。在长期的生产生活中,各民族形成了与当地农业生态系统相关的民族传统习惯文化。当地的农业生态系统影响着当地民族传统文化,当地的民族传统文化与当地的农业生态系统相互依存并互相影响(罗瑛, 2022)。例如一些山区的村落十分崇尚大自然,其传统文化与资源管理方式对当地的农业生态系统多样性保护和发展具有积极作用,所以当地的农业系统多样性十分丰富(王云靓和薛达元, 2015)。而一些民族文化会猎取图腾兽,做出一些破坏当地农业生态系统多样性的行为。但随着社会的发展,一些有利于农业生态系统多样性保护的民族传统文化(如相信动物有灵、对山林崇拜等)正在逐渐消失,某些民族传统文化的丧失最终会导致农业生态系统多样性的减少(张乃明等, 2021)。所以民族传统文化与农业生态系

统多样性之间相互作用、共生共存。

2 农业生态系统多样性的研究进程

农业生态系统研究目前越来越受到关注，总结国内外的研究进展可以归纳为以下7个方面。从国外的研究看包括3个方面：(1)生态系统多样性概念的提出。从Tansley (1935)创造了“生态系统”一词之后，Lindeman (1942)通过对水生生态系统的能量流动的研究，证明生物和非生物之间的能量和物质交换使一个群落与其环境不可分割，从而引入了现代生态系统的概念。Fisher等(1943)在研究物种数量与动物种群中的随机样本个体数量的关系中，首次提出了“多样性指数(index of diversity)”的概念。Williams等(1944)讲解了对数、级数与多样性指数在将个体划分为物种和将物种划分为属等问题中的应用。1974年9月在荷兰海牙举行的第一届国际生态大会定义了生态系统多样性的概念，它包含两个部分，即物种丰富性或种群的数量，以及每个种群内个体相对丰度分布的均匀性。(2)农业生态系统多样性的理论和实践。农业生态系统是介于自然生态系统(如森林和海洋生态系统)和人工建造的系统(如城市生态系统)之间的生态系统，它是按人的意愿建立的，并在人的严格调控管理下进行操作和运行的(Conway, 1987)。农业生态系统多样性是一种多学科的综合研究，国外对生态系统多样性的研究自20世纪80年代以来表现出了迅速发展的趋势，为农业生态系统多样性的研究奠定了很好的基础。20世纪90年代后，美国生态学家May等人将生态多样性的理论应用到农业生态系统中，提出了“农业多样性理论”，以及改善农田生物多样性和农业生态系统多样性的一系列措施。此外，20世纪90年代至今，涌现出了较多农业生态系统多样性的研究与论述(De Steenhuijsen Piters, 1995; Collins & Qualset, 1998; Brookfield & Stocking, 1999)。Altier和周锦铭(1992)首次强调了农业生态系统中生物多样性的应用。(3)农业生态系统多样性的评估。之前的研究只停留在简单的定义和保护措施上，随着景观生态学的发展，一些表述景观多样性特征的方法也建立起来，景观生态学中分析斑块类型多样性的定义和概念也随之应用于农业生态系统的多样性分析。除了沿用之前传统的生物多样性测度指数评估方法，在

更大尺度上农业生态系统多样性的评估更多采用模型模拟的方法。模型可以模拟各种条件，并在实施之前评估管理实践并从实践结果中提出建议。使用这种方法可以提前预防生态系统的破坏与生物多样性的丧失。在这之后出现了许多评估模型与指标，Cingolani等(2005)使用MSL (Milchunas-Sala-Lauenroth)模型研究放牧对植物群落多样性的影响。Alkemade等(2013)利用GLOBIO模型研究不同农业生产情景对牧场农业生态系统多样性的影响，Nagy等(2017)利用植被的自然资本指数作为评估农业景观多样性的指标。

相比国外的生态系统多样性的研究，国内起步较晚。可以概括为4个方面：(1)环保意识的觉醒。1972年6月5日，联合国第一次人类环境会议召开，大众的环保意识尚处于萌芽阶段，我国派代表团参加了会议，自此政府开始认识到我国也存在严重的环境问题，并且环境问题会对经济社会发展产生重大影响。1977年我国开展了环境质量普查，在农业生产中，因灌溉化、肥料化、使用化学物质控制病虫害与杂草等技术措施以及工业发展，农业环境遭到一定程度的污染。陶战(1977)提出加强农业环境研究是发展农业的迫切要求。(2)认识到农业生态系统多样性研究的重要性。高亮之(1980)提出农业生态经济系统与农业现代化是密不可分的，指出农业生态系统就是农业生物、农业环境和农业技术3方面组成的综合体系。这对农业生态系统进行了初步的定义。闻大中(1995)对农业生态系统进行了更为详细的定义和分类，并提出了农业生态系统多样性评价特征的一些指标，强调了农业生态系统多样性研究的重要性。这对我国之后探讨与研究农业生态系统多样性有极其重要的意义。(3)农业生态系统多样性评价指标的建立。袁从祎(1995)认为农业生态系统多样性的评价指标主要有总体优势度与多样性指数两类，并提出了农业生态经济系统多样性的评价体系。目前常用的方法是通过分析生态系统的物种组成来评价生态系统的多样性，一个生态系统内物种组成丰富且均匀，那么就认为该生态系统的多样性高。许健民等(1997)通过对我国5个典型农业类型区农田生态系统多样性现状的调查，建立了农田生态系统多样性的数据库，计算了各农田生态系统多样性指标，结果表明我国主要农业地区的最大

丰富度相差不大且普遍偏低。章家恩(1999)分析农业生物多样性的现状和发展态势的同时，提出农业生态系统包括了产业结构、景观、物种和遗传的多样性。卢兵友和蒋广洁(2001)对乡村农业生态系统结构多样性与系统可持续性关系进行研究，发现农业生态系统多样性的提高与结构的合理化会对系统的可持续发展起到良好的推动作用。之后的研究逐渐把农业生态系统多样性与农业的可持续发展联系在一起，进一步扩大了农业生态系统多样性的研究范围。(4)农业生态系统多样性的综合管理。唐建军和陈欣(2001)对农业生态系统中生物多样性的综合管理进行了详细论述，从生境、物种、基因型3个层面上分析农业生态系统多样性的保护管理措施以及建立途径与最佳分布格局。自此之后，如何对农业生态系统多样性进行保护管理成为了研究重点。生态系统服务功能是20世纪70年代生态学领域出现的一个新的研究热点，宋绪忠等(2007)从生态学角度探讨了农业生态系统服务功能多样性与农业生态系统复杂性的关系，指出要持续发挥多样性的生态系统服务功能，复杂的农业生态系统需要在多尺度保持自身的多样性。刘云慧等(2012)发现现代集约化的农业生产方式极大地改变了农业景观生物多样性和生态系统服务功能，进而影响到农业可持续发展，但是仅仅改变集约化的管理制度，并不足以促进农业景观多样性的恢复，尚需考虑景观结构的调整和管理，从不同尺度上优化景观要素的空间配置和景观管理方式。党的十八大提出了生态文明建设，之后农业生态系统多样性的研究不再局限于种植制度、作物种类、保护管理措施等，其研究内容还扩展到了人类食品安全，同时和社会经济等因素有紧密的联系。陈兴等(2017)认为外来生物对农业生物的影响主要体现在农业生态系统的多样性和农业遗传的多样性等几个方面。预防入侵物种所带来的经济、社会危害，我们应注重农业生态系统多样性的保护。习近平总书记在党的二十大报告中指出，我们要提升生态系统多样性、稳定性、持续性，首次把生态系统多样性从生物多样性中提出来单独强调。农业生态系统多样性研究中，不同农业活动下生境多样性的变化趋势、维持生态平衡情况下生境多样化中的物种多样性保护措施将是今后应开展的研究重点。

3 我国农业生态系统多样性研究的主要集中区域

目前我国农业生态系统多样性研究可以分为4大区域，包括下辽河平原沈阳地区、华北平原衡水地区、黄土丘陵延安地区、南方红壤丘陵常德地区。

3.1 下辽河平原沈阳地区农田生态系统

下辽河平原位于辽东丘陵与辽西丘陵之间，是我国最大的平原——东北平原的重要组成部分，其自然资源尤其是矿产资源与农业生态系统多样性十分丰富，农业生产占到了全省的60%，是沈阳地区粮食的主产区。该地区以水稻和玉米等粮食作物种植为主，并且从时间动态看粮食作物中玉米、高粱、谷子、薯类的种植面积在增加，而水稻、小麦、大豆在缩小。像大豆、花生、向日葵这样的经济作物的种植面积持续在下降，尤其是向日葵，现在已不再种植(表1)。可以看出沈阳的种植结构从种植主粮向种植多元化粮食作物发展。

面积上，耕地为下辽河平原沈阳地区的景观基质，其次为林地、农村居民用地、水域景观。景观水平上，农田景观整体多样性程度相对较高，斑块空间连接度比较好，但分布均匀化程度较为一般，耕地面积的先增后减，林地、草地面积的先减后增，以及建设用地面积的持续增加是景观格局演变的主要特征(孙才志和闫晓露，2014；李蕴琪等，

表1 沈阳市主要农作物种植面积。粮食作物面积包含非主要农作物面积。
Table 1 Planting area of major crops in Shenyang city. Food crops include non-main food crops and main food crops.

种植面积	Planting area	2009 (ha)	2014 (ha)	2019 (ha)
所有农作物	All crops	648,300	627,900	680,500
粮食作物	Food crops	508,800	485,100	546,000
水稻	Rice	126,800	111,800	118,100
小麦	Wheat	2,200	1,400	1,400
玉米	Maize	389,100	347,200	389,100
高粱	Sorghum	2,600	1,400	3,700
谷子	Millet	1,100	500	3,600
薯类	Potato	12,400	10,700	18,500
大豆	Soybean	20,900	9,900	10,000
花生	Peanut	39,200	41,700	31,900
向日葵	Sunflower	3,200	0	0

数据来源：2010年、2015年和2020年《辽宁统计年鉴》

Data source: Liaoning Statistical Yearbook in 2010, 2015 and 2020

2020)。边振兴等(2015)以2012年遥感影像为基础数据,利用GIS技术揭示了趋向农田管理集约化的现代农业景观使农业生态系统多样性下降,并且受城市化影响,城市近郊以高度集约化的现代技术产业农田为主。

3.2 华北平原衡水地区的农田生态系统

衡水地区位于河北省东南部,华北平原中东部。境内河流较多,地形以微斜平地 and 低洼地居多,土壤类型多为潮土。衡水地区四季明显,雨热同季,光热资源十分充足,有利于农作物生长。全市可利用耕地高达1,100万亩,衡水地区野生高等植物有75科207属369种,农作物有小麦、玉米、花生、大豆和棉花等,是河北粮食主产区之一(赵建成等, 2005; 李建明, 2010)。衡水的主要种植模式仍为小麦和玉米一年两作的轮作模式,棉花、玉米、大豆等主要粮食作物连作或彼此轮作的稳定式类型为华北平原衡水地区的次要耕作模式类型,分布在离村落较远的地方,且往往大块连片。比对近5–10年的数据发现(表2),该地区以小麦和玉米这类粮食作物种植为主。玉米和小麦的种植面积有持续增加的趋势,而谷子、高粱、大豆等粮食作物有减少的趋势。经济作物中棉花、芝麻、花生的种植面积持续在减小,但是油菜籽种植面积的增幅较大,这是因为河北省深入贯彻实施《河北省农业供给侧结构性

表2 衡水市主要农作物种植面积。粮食作物面积包含非主要农作物面积和粮食作物面积。

Table 2 Planting area of major crops in Hengshui city. Food crops include non-main food crops and main food crops.

种植面积	Planting area	2009 (ha)	2014 (ha)	2018 (ha)
所有农作物	All crops	840,595	844,304	869,623
粮食作物	Food crops	575,483	591,207	710,791
小麦	Wheat	278,306	284,581	334,438
玉米	Maize	267,408	289,966	362,782
谷子	Millet	7,145	4,847	2,831
薯类	Potato	6,309	3,733	2,974
高粱	Sorghum	1,206	492	464
大豆	Soybean	13,384	6,050	5,461
花生	Peanut	34,564	25,711	17,516
油菜籽	Rapeseed	207	35	1,400
芝麻	Sesame	1,142	782	365
棉花	Cotton	139,624	117,417	49,810

数据来源: 2010年、2015年和2019年《河北农村统计年鉴》

Data source: Hebei Rural Statistical Yearbook in 2010, 2015 and 2019

改革三年行动计划》和《河北省优势特色农产品提质增效实施方案》,使种植结构更加优化,特色优势粮油产业快速发展。

有关研究表明,因为原生、半原生环境减少,导致依赖原生或半原生环境的植物与一些爬行动物的种群数量明显减少,该地区农业生态系统的物种多样性总体上呈现下降趋势,但是一些r选择的物种(如蚜虫、棉铃虫等)的种群密度很不稳定,它们通常出生率高、寿命短、子代死亡率高和有较强的扩散能力,因此对于多变的栖息生境,适应力极强的物种的种群数量会明显增多(薛建民等, 2014)。再加上农村生活发生转变,农业机械化程度提高,频繁的耕作,使绝大多数农田动植物种群数量减少甚至灭绝。但近年来随着《河北省生物多样性保护与利用规划》的颁发与执行,衡水地区的农业生态多样性的基础研究得到了增强,就地保护成效显著,野生动植物迁地保护初显规模,种质资源保存和生物标本储备快速发展。农业生态系统多样性也得以保护与提高。在渔业方面,自20世纪70年代以来,开展大规模的经济建设和资源开发使当地渔业资源与农业生态系统多样性严重衰退,2005年以后衡水地区加大了增殖放流力度,对当地濒危水产资源进行补充,同时也促进了经济发展,提高了当地的渔业农业生态系统多样性(杭佳等, 2016)。

3.3 黄土丘陵延安地区的农田生态系统

黄土丘陵延安地区位于中国西北内陆腹地,横跨黄河和长江两大流域中部。该地区日照充足、昼夜温差大、年平均气温9.9℃,年均降水量507.7 mm左右,年均无霜期170 d。该地区为新造贫瘠耕地,马铃薯为该地区主要农作物,大面积种植模式以粮豆作物的连作和单作为主。比对近5–10年的数据发现(表3),该地区的农作物总播种面积持续减少,并且麻类已经不再种植,这是由于不合理的土地利用使该地区的水土损失和土壤养分流失严重,给当地自然生态系统造成了严重的破坏,导致当地农业生态系统多样性日渐被破坏。20世纪70年代末期以来,国家在黄土高原建立了多个以实现水土保持为目的的生态治理示范区,希望通过增加人工植被、提高植被覆盖度来减缓当地严重的土壤侵蚀过程,这也影响到当地的农业生态系统多样性。有关研究发现黄土丘陵区生态环境干扰最为严重,生态格局

表3 延安市主要农作物种植面积。粮食作物面积包含非主要农作物面积和粮食作物面积。

Table 3 Planting area of main crops in Yan'an City. Food crops include non-main food crops and main food crops.

种植面积 Planting area	2010 (ha)	2014 (ha)	2019 (ha)
所有农作物 All crops	252,570	244,580	183,300
粮食作物 Food crops	209,560	200,400	144,360
小麦 Wheat	6,850	400	230
稻谷 Rice	1,310	470	1,440
玉米 Maize	71,100	81,370	72,790
大豆 Soybean	23,280	23,740	16,590
棉花 Cotton	720	1,080	560
油菜籽 Rapeseed	2,390	2,210	1,540
花生 Peanut	2,260	2,370	680
烤烟 Tobacco	2,430	1,770	1,130
蔬菜 Vegetable	19,540	23,430	22,040
麻类 Hemp	10	0	0

数据来源：2011年、2015年和2020年《陕西统计年鉴》

Data source: Shaanxi Statistical Yearbook in 2011, 2015 and 2020

在空间分布上有不均匀性和复杂性，复杂的地貌对土壤和植被生长有显著影响(张芳和周忠学, 2010; 杭佳等, 2014)。随着西部大开发战略的实施，尤其是退耕还林工程对农业生态系统产生了一定影响，优化了土地利用结构，退耕地植被自然恢复，植物多样性指数不断增加，推动了延安市生态环境的改善以及农业生态系统多样性的提高，该地区农业生态系统的发展变化趋于高效、稳定和可持续(刘建军等, 2002; 李蕴琪等, 2020)。

3.4 南方红壤丘陵常德地区的农田生态系统

南方红壤丘陵常德地区位于洞庭湖水系沅江和澧水中下游，该地区气候温暖、雨水充沛、日照充足，是江南著名的“鱼米之乡”。截至2021年常德市已经连续17年位居湖南省粮食播种面积和产量第一。农作物种类以水稻、油料作物等为主，模式以水稻、油菜和绿肥的轮作及棉花套油菜为主。常德也是我国经济林果(柑橘等)和经济作物(茶叶等)重要产区。比近5–10年的数据发现(表4)，总体农作物种植面积近年来呈下降趋势，其中蔬菜的种植面积却呈上升趋势，这可能是因为该地区受农作物种植结构调整政策及市场的影响。另外，该地区土壤透水性差且质地比较黏重，季节性降雨分布严重不足，所以极易发生水土流失。并且由于自然灾害的影响和人类活动造成的土地不合理利用，常德市的红壤生态系统面临水土流失、季节性干旱、土壤酸化、土壤侵蚀等衰退过程，造成当地农业生态系

表4 常德市主要农作物种植面积。农作物总种植面积中包含非主要农作物面积。

Table 4 Planting area of major crops in Changde City. Total planting area of crops include non-main crops.

种植面积 Planting area	2009 (ha)	2014 (ha)	2018 (ha)
所有农作物 All crops	1,162,450	1,228,050	1,076,210
粮食作物 Food crops	663,030	704,550	576,890
稻谷 Rice	578,750	604,010	517,170
小麦 Wheat	12,030	17,060	15,600
玉米 Maize	28,580	40,200	26,000
花生 Peanut	7,650	6,570	6,000
油菜籽 Rapeseed	286,830	299,520	291,000
棉花 Cotton	78,620	88,800	43,500
麻类 Hemp	9,080	1,370	1,000
烟叶 Tobacco	4,520	4,460	5,000
甘蔗 Sugarcane	2,850	1,480	1,000
蔬菜 Vegetable	87,530	96,200	114,000

数据来源：2010年、2015年和2019年《湖南统计年鉴》

Data source: Hunan Statistical Yearbook in 2010, 2015 and 2019

统的退化与生产力下降，制约了红壤地区农业的可持续发展(孙波等, 2018)。

近些年，常德市农业生态环境得到有效保护和改善的同时，也存在农业自然资源严重短缺与资源严重浪费，生物资源减少，农业面源污染等问题导致的农业生态多样性严重丧失(郑殿升, 2005)。有关研究发现，常德市农业野生植物保护开发利用水平较低，一般都被视为杂草从而被防除，导致当地农业野生植物资源多样性降低(刘玉春等, 2014)。为了提高农业生物多样性，常德近年来在渔业方面开展了“一江一湖四水”“十年禁渔”和“生态环境与生物多样性保护”优先战略，推进生态环境与生物多样性的保护。2021年常德市开展了农业种质资源普查，旨在摸清常德市重点种质资源，丰富农作物种质资源的数量和多样性，防止具有重要潜在利用价值种质资源的灭绝。这些措施都是常德在农业生态系统多样性保护上的实践。

4 生态系统多样性的主要评估方法和指标

目前已有许多方法和指标被应用到生态系统多样性的评估中，大致可以分为以生态学研究为目的的测度指标和面向决策领域的综合评估指标。农业生态系统多样性与生态系统多样性的评估方法与指标一致。在生物多样性的评估研究中，对自然群落或物种多样性问题已有较多研究，目前有多种定量表示物种多样性的指标，这些评估方法和指标

给生态系统多样性的评估工作带来启迪和借鉴, 但评估生态系统多样性的同时也会受到许多政策和制度的影响, 这使得生态多样性评估还是一个异常复杂且困难的问题, 迄今为止仍缺乏一个被广泛接受的生态多样性评估框架(闻大中, 1995; 栗忠飞和高吉喜, 2018)。研究目的不同会产生不同的研究方法 with 指标。本文通过中文和英文检索方式, 选择按相关性排序, 采用中文关键词(生态系统多样性 + 评估方法与指标)和英文关键词组合(ecosystem diversity AND assessment methodology) OR (ecosystem diversity AND evaluation indicators)分别检索中文和英文数据库。其中, 英文数据库采用 Web of Science、SpringerLink、Science Direct、PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)等, 中文数据库采用中国知网。文献检索时间范围为 2012 年 1 月至 2022 年 10 月。随机选取了在国内外数据库中发表的 100 研究方法篇论文(按相关性排序前各 50 篇)。其中国外评估生态系统多样性时使用物种分布模型的占 14%, InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型占 12%, 以地理信息系统和遥感技术为基础利用土地利用变化进行评估的方法占 10% (图 1)。在国内 InVEST 模型使用占到了 22%, 以地理信息系统和遥感技术为基础利用土地利用变化进行评估的方法占 14%, 压力

-状态-响应模型(pressure-state-response)占到了 10% (图 2)。由于各个国家的研究方法与指标都不统一, 所以使用模型或者框架种类多样。在国外, 物种分布模型是生态系统多样性的评估中使用最为广泛的模型, 因为它可以高效地判断物种潜在分布区, 从而评估出生态系统多样性, 快速制定相应的保护或防治计划, 更大程度地维持生态系统多样性。但由于人为采集这些分布数据存在工作量较大、物种分布范围广、野外工作艰苦等问题, 并不能达到最优结果。综合国内外数据看, InVEST 模型使用最为广泛, 同时根据外媒 NatCap 2016 年的调查, InVEST 模型在 2012–2014 年间运行了超过 40,000 次, 该工具在美国使用最为频繁, 占运行次数的近一半 (44%), 并且在其他 103 个国家都有用户。InVEST 模型的结果能以地图形式更为具体的空间化的表达出来, 更能体现其服务价值。其次是以地理信息系统和遥感技术为基础利用土地利用变化进行评估的方法, 它用于生态系统多样性评估领域, 不仅可以不同尺度上开展生态系统多样性评估, 也可实现生态系统多样性及系统内结构要素的评估, 但其结果精度难以保证。目前在国际上尤其是国内, 驱动力-压力-状态-影响-响应(DSPIR)与压力-状态-响应(PSR)模型的综合评估方法也得到了广泛应用。这是面向决策领域的、考虑人类活动和自然环

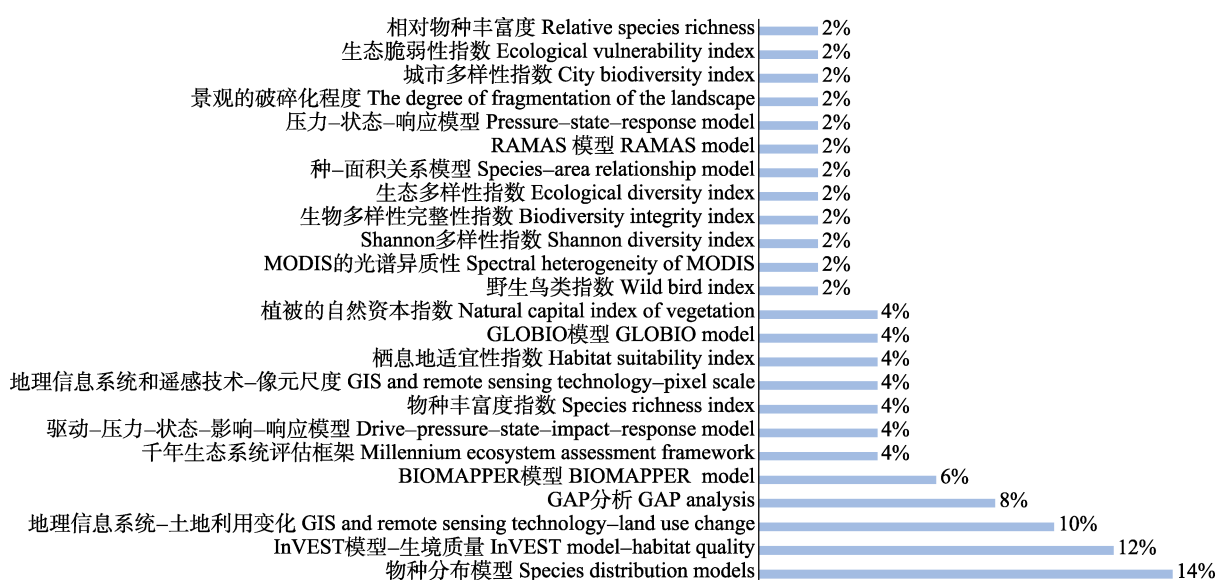


图1 国外现有生态系统多样性主要的评估方法和研究指标所占的比例

Fig. 1 The proportion of main assessment methods and research indicators of ecosystem diversity in foreign countries

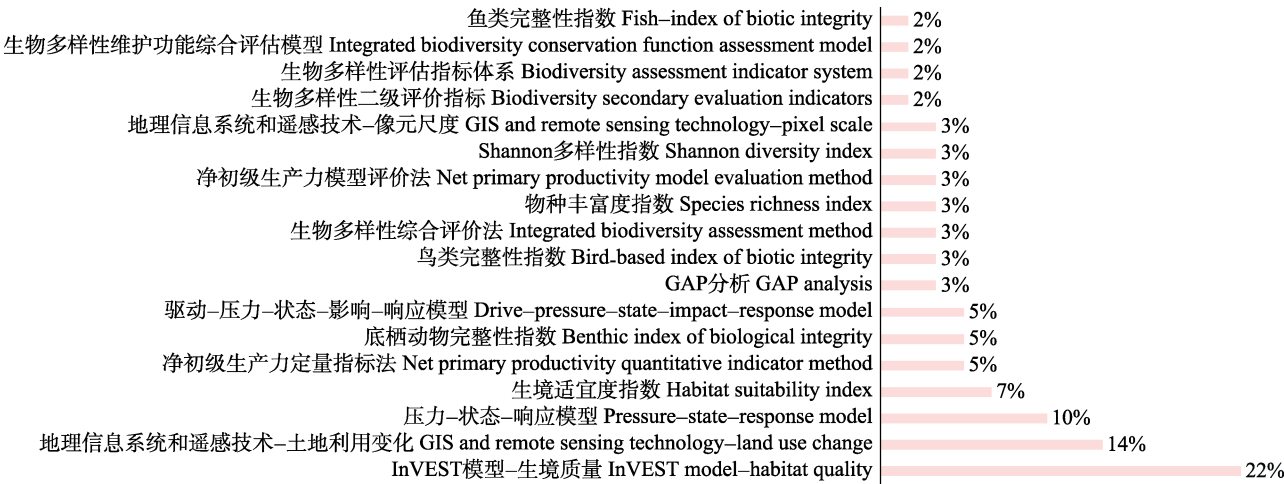


图2 国内现有生态系统多样性主要的评估方法和研究指标所占的比例
Fig. 2 The proportion of main assessment methods and research indicators of ecosystem diversity in China

境的更为综合的评估方法指标。

从生态系统多样性评估方法和指标应用领域广泛程度的角度看，通过对国内外数据库中查找的100篇论文(按相关性排序各前50篇)进行分析，我们发现国外在生态系统多样性的评估中有关森林方面的研究偏多，国内在有关湿地与流域方面的研究偏多(附录1, 附录2)。综合国内外生态系统多样性评估方法与指标，现如今使用InVEST模型较为广泛，在流域、湿地、农业用地等不同的领域，在国内研究中还有省级、市级和县级这种小区域的行政单位，也常用InVEST模型进行评估(附录3, 附录4)。而国外在生态系统多样性评估领域使用InVEST模型比例偏少，主要以地理信息系统和遥感技术为基础利用土地利用变化进行评估的方法偏多，应用到了森林、山谷等地，涉及省级、市级等行政单位。虽然都是以遥感技术检测手段为基础，但在大区域尺度上，如各大洲的生态系统多样性评估方法中会使用GAP分析。这是一个快速有效的生态系统多样性评估方法，但是忽略了土地状态中与物种脆弱性的关系，难以在较小尺度上应用。尽管研究生态系统多样性的文献越来越多，但有相当一部分生态系统多样性的研究是没有进行任何直接的生态系统多样性评估。尽管在生态系统多样性评估中对模型使用的需求也很高，但目前还没有普遍认同的最佳实践标准来指导这些模型的建立和评估这些模型的充分性。

综合以上的生态系统多样性评估方法与指标，

大致可以分为4类：(1)基于代理指标的评估方法。代理指标是指与生态系统多样性具有相关性的特殊生物类群或环境因子，例如植被的自然资本指数(NCI)、底栖动物完整性指数(B-IBI)、鸟类完整性指数(Bird-IBI)等，用来指示生境质量和生态决策执行状况的变化，依此来评估生态系统多样性。(2)基于遥感技术的评估方法。遥感影像实现了长期的时空尺度的评估，可以从单个物种到全球尺度，动态地全面覆盖宏观尺度上的结构数据，大致分为以土地利用变化为指标的评估方法和以像元尺度为指标的评估方法。(3)模型的评估方法。基于不同的函数计算，通过对有关可以表达生态系统多样性的数据或信息进行表示、加工、变换最后输出生态系统多样性评估的结果，例如InVEST模型、种-面积关系模型、BIOMAPPER模型。(4)多指标体系框架的生态系统多样性综合评估。它依赖于多种学科数据交叉，可涵盖社会、经济、环境等要素，能够表明社会、经济和人类活动对生态系统多样性造成的威胁，也可通过响应指标来表明人类活动及其最终效应导致的环境对社会的反馈。从而构建多指标的体系以开展综合评估，例如DPSIR模型与PSR模型等。

目前使用较为广泛的InVEST模型是通过生境质量的高低，评估区域生境质量，测定生物多样性维持能力，进而间接衡量生态系统多样性维持功能的时空变化，为生物多样性评价与保护性研究提供定量参考。近年来，一些国内的学者、研究人员已

经成功地将InVEST模型应用在长江中下游地区、洞庭湖地区、疏勒河流域、西南地区生态系统服务功能与生物多样性的定量评估中(邓楚雄等, 2021; Li et al, 2021; 刘纯军等, 2021; 刘洋等, 2021)。在农业生物多样性的划分中, 农业产业结构多样性是农业生物多样性的的重要组成部分, 包括种植业、林业、畜牧业、副业和渔业的组成比例与结构变化(章家恩, 1999; 农区生物多样性编目编委会, 2008)。生态系统多样性在不同的分类方法中也会采用不同的评估方法与研究指标。例如在农业规划、行政区域的农业生物多样性评估方面, 汤翠凤等(2015)以调查的行政区域(县、乡镇)、民族和生物资源用途为分析单元, 采用生物多样性测度指标(物种丰富度、优势度、多样性指数、均匀度指数和相似性系数)评估了贵州省贞丰县、松桃县6乡(镇)不同民族管理利用的农业生物资源物种多样性。在经济作物种植方面, 许龙等(2015)采用了生物多样性风险与机遇评估方法, 对英美烟草(BAT)与中国合作的烟区进行评估, 对生物多样性的中、高等风险和机遇制定了行动及监控计划, 并提出预防或减轻不良影响的对策和措施来保护农业生物多样性。

5 农业生态系统多样性的主要保护措施

我国是农业大国, 也是世界上农业生态系统多样性最丰富的国家之一, 在农业生态系统多样性保护方面已取得长足成效。我国通过原生境和异生境保护, 促进了农作物物种多样性和遗传多样性的保护, 进一步推动了农业生态系统多样性的保护。同时通过利用农业生产管理的多样化促进了保护的可持续性。农业热点地区景观多样性的保护打造了传统农业文化遗产地, 推动了传统农业和传统知识的保护和利用, 同时保存了珍贵的传统作物遗传资源, 并真正惠益于当地的民生, 但目前仍面临诸多挑战。

5.1 原生境保护

原生境保护主要是让生物继续在原始生存地栖息, 并建立保护区使当地生态环境不被破坏。原生境保护是种质资源保护最基本最重要的方法, 因为能够保护植物的整个群落及其栖息地, 所以是最有效的方法。国际上主要将原生境保护分为两大类: 一类为物理隔离(physical isolation)方法, 另一类为

主流化(main streaming)方法(王云等, 2013)。主流化方法往往需要当地农民有很强的学习和参与保护农业生态系统多样性的意识。原生境保护方式最大的优点是可以完整地保存物种的遗传多样性, 还可以进一步使科学家在将来的研究中不断地发掘其潜在的利用价值(Jones et al, 1976; 陈成斌, 2002)。原生境保护是既保护物种的遗传特性, 又保护物种的遗传变异性, 同时保护点建成后能够长期维持, 其当地特殊的农业生态系统多样性也得以保护(杨庆文等, 2003)。作物遗传资源原生境保护主要有地方品种的农民参与式了解与保护野生植物原生境建设两个方面(郑晓明和杨庆文, 2021)。例如在云南有许多农家水稻品种, 农民在同一块田里会种植多个水稻品种, 既可以使病虫害减少, 又保护了水稻遗传资源, 同时也增加了农业生态系统多样性。东乡野生稻也是采取原生境保护措施, 规划出核心区(禁止除野生稻研究外的一切人类活动)和缓冲区(允许管理人员从事不破坏野生稻生存环境的农业生产), 从而达到农业生态系统多样性保护的目的(郭辉军等, 2000)。

5.2 异生境保护

如果说原生境保护是保护农业生物多样性最有效的措施, 异生境保护就是对原生境保护的有力补充。异生境保护只能作为一种便于研究与利用的方式, 第三次全国农作物种质资源普查与收集行动发现, 约80%种质资源已经在原产地或原生境消失, 通过异生境基因库保存的资源, 可以经过扩繁重新充实种质资源库, 使其得以继续为当地产业发展和生态环境系统恢复提供服务, 对恢复当地农业生态系统多样性有着重要的作用(辛霞等, 2022)。尤其是当前农作物、畜牧、水产新品种的推广导致品种向单一化形式发展, 同时也会导致遗传多样性的丢失。世界范围内大多通过种质库等异地保存方式来保护传统农作物、畜牧、水产种质资源。

异生境保护是通过建设种质资源库将其迁移到其生境之外的地方进行保护, 从而避免了遇到无法抵挡的自然灾害或者人为活动时遭遇灭绝。我国自20世纪50年代起就一直重视种质资源的保存, 至2020年底, 我国已建野生植物种质资源保护和培育基地400多处, 其中植物园和树木园近200个, 保藏种质资源共105万份以上(Tucker et al, 2009)。其中

仅农作物就保存约50万份(周桔等, 2021)。

5.3 农业生产系统保护

通过农业生产的合理利用促进农业生态系统多样性保护的方式近来也成为一大热门。如不同科属的作物进行间作或不同品种间的混播。有关研究发现, 辣椒和玉米间作可以降低炭疽病的发病率, 延缓病害的发生(Gao et al, 2021)。郭世保等(2009)对6个品种小麦混播进行研究, 发现混播可以有效控制小麦条锈病的发生。以生态系统多样性布局为基础, 将不同农作物品种进行混合栽培的科学模式, 既可以起到保护农作物品种的作用, 同时也避免了单一品种收益不好时而造成的颗粒无收。稻田养鱼也是一种通过利用农业生产系统多样性的促进保护模式, 不仅减少了水稻虫害、促进营养物质循环利用, 而且也增加了田间物种多样性, 提高了生产效率。在景观方面可以建立优先保护与利用相结合的生态产业园区、采摘园等, 这些园区在兼顾生态功能、保护的同时也突出了其旅游功能。利用满足人们回归大自然、农田的心愿, 促进了农业生态系统多样性的保护。

5.4 农业生态景观保护

农业生态景观保护的关键在于区分并优先保护农业景观生物丰富的热点区域, 保护和建立连接残存的自然、半自然生境或新建生态廊道增加农田景观的连接度, 提高集约化程度较低的农业用地面积, 例如打造农业文化遗产地、传承典型传统农业耕作系统等(刘云慧等, 2010)。农业文化遗产具有生态多样性优势、独特的农业生态景观以及优秀的传统知识和技术, 对乡村振兴具有重要的意义(但方等, 2022)。农业文化遗产既在于弘扬我们的传统农业文化, 也可以塑造好文化衍生品牌, 为农业增效注入新动能, 实现当地居民的共同富裕, 推动农业的可持续发展。农业文化遗产还能与自然环境协同发展推动文化旅游产业(张阳, 2022)。农业生态系统多样性本身可以作为农业文化的载体, 对农业文化遗产有效的保护也是对农业生态景观多样性的保护。习近平总书记曾在“三农”工作中强调“乡村振兴发展必须传承发展提升农耕文明”。从生态学视角看, 中国的典型传统农业耕作系统本质上是一种生态型农业, 在精耕细作的传统中蕴含着生态系统物质循环利用的原理, 生态施肥能合理利用物种之间

的关系以提高产量, 运用“三才”论即作物生长发育的条件及其相互关系的理论对农业生态系统进行整体调控等, 这些都有助于推动当今生态文明建设(罗顺元, 2011)。

6 农业生态系统多样性研究的主要问题和展望

农业生态系统多样性在维持农业生态服务功能、提高农业生态系统的可恢复力、减少化肥农药污染和发展绿色农业方面发挥着重要作用, 也越来越成为研究热点, 但从目前的研究和保护利用情况看, 今后需要在以下方面加强:

(1)完善农业生态系统多样性评估指标和方法。农业生物多样性数据存在收集困难、不完善、不具有导向性的问题。我国采用的评估技术与方法, 特别是在农业生态系统多样性方面, 仍然存在分歧。例如对不同生物类群的调查方法不同, 导致农业生态系统多样性的调查评估难度加大, 并且随着现代经济科技的高速发展, 全国的土地利用格局产生的变化也对农业生态系统多样性的评估造成了极大影响。由于对专业化要求的程度高, 农业生态系统多样性影响评价工作也仍然处于初期阶段, 农业生态系统多样性评估方法与指标相关研究内容很少。因此, 面对农业生态系统多样性评估方法这一问题, 应进一步完善评估技术体系, 并建立物种多样性保护基础数据库。

(2)加强农业生态系统多样性管理政策和协调机制。国内农业生态系统多样性的管理协调机制不完善。首先农业生态系统多样性概念比较抽象, 不像气候自然灾害等易让人理解, 随着各方开始关注农业生物多样性风险, 随之产生了相关的应对机制包括农业保险的出现, 但是由于农业生物多样性信息机制就并未建立, 很难让大家了解农业生态系统多样性的降低会对农田、牧场或者水产等农业产业产生危害, 也就缺少针对农业生态系统多样性问题的管理和协调机制。因此必须加强农业生态系统多样性管理的政策和协调机制建设。

(3)加大农业生态系统多样性保护和利用力度。由于过度开垦及大量化肥农药的投入, 使农业生境的退化和破坏严重。其次外来物种的威胁造成的损失严重, 截至2020年底, 我国已发现660多种外来

入侵物种, 其中71种对自然生态系统已造成或具有潜在威胁并被列入《中国外来入侵物种名单》; 69个国家级自然保护区外来入侵物种调查结果显示, 219种外来入侵物种已入侵国家级自然保护区(生态环境部, 2021)。另外环境污染和气候变化同样严重威胁农业生态系统多样性, 给农业生态系统多样性的保护带来新的问题与挑战。2020年联合国《生物多样性公约》秘书处发布了第五版《全球生物多样性展望》(GBO5), 就2010–2020年全球生物多样性目标取得的进展与完成情况进行了评估, 结果表明全球20个纲要目标中仅实现了6个, 并且其中没有农业相关的保护目标(UNEP, 2020)。

(4)农业生态系统多样性主流化。农业生态系统多样性有关政策一直是“主流化”规范缺失, 但是随着对全球农业生物多样性重视程度增加, 我国必将也会更加重视的农业生物多样性及农业生态系统多样性保护政策的重要性。《生物多样性公约》缔约方大会第十五次会议(COP15)强调了农业生物多样性的重要性。联合国粮农组织《2022–2031年战略框架》也提出了农业生物多样性这一核心问题。中国共产党第二十次全国代表大会上的报告在谈到新时代新征程中国共产党的使命任务时, 也强调提升生态系统多样性、稳定性、持续性。与党的十九大报告中“提升生态系统质量和稳定性”的要求相比, 增加了“多样性”。在乡村振兴与农业文化遗产的保护中, 农业生物多样性是重点, 农业生态系统多样性更是极其重要的对象, 为当地社区居民生活提供重要的保障, 合理利用农业生态系统多样性, 成为乡村振兴和可持续发展战略中的关键, 将发挥越来越重要的作用。

诚然当下我们仍然面临很多问题和挑战, 农业生态系统多样性保护必须探索新的途径和方法, 现有的生态系统多样性保护规划和政策主要针对自然保护区的规划, 在集约化生产的条件下, 尽管建造沟渠、人工林、树篱廊道等一些半自然生境以及传统农业耕作方式的运用在一定程度上有利于农业生态系统多样性的保护, 但由于缺乏针对性和目的性, 其效应还有待探讨。通过对农业景观的规划措施实现农业生态系统多样性的保护及相关政策措施的制定, 现有关农业生态系统多样性的报告颇少我们还有待进一步研究。我国农业生态系统多样

性的危机已无声降临并日趋复杂与多样, 作为全球农业生态系统多样性最为丰富和全球重要农业文化遗产最多的农业大国, 需要进一步加强农业生物多样性保护与生态环境保护的力度。

参考文献

- Alkemade R, Reid RS, van den Berg M, de Leeuw J, Jeuken M (2013) Assessing the impacts of livestock production on biodiversity in rangeland ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 20900–20905.
- Altieri MA, Zhou JM (1992) Application of biodiversity in agroecosystems. *Resource Development and Conservation*, 2, 158–160. (in Chinese with English abstract) [Altieri MA, 周锦铭 (1992) 生物多样性在农业生态系统中的应用. 资源开发与保护, 2, 158–160.]
- Bian ZX, Zhu RX, Yu ZR, Wang QB, Li JH (2015) Effect of urban expansion on non-agricultural habitats in farmland landscape: A case study of Shenbei new district, Shenyang City, Liaoning Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23, 1053–1060. (in Chinese with English abstract) [边振兴, 朱瑞雪, 宇振荣, 王秋兵, 李金泓 (2015) 城市扩张对农田景观中非农生境的影响——以辽宁省沈阳市沈北新区为例. 中国生态农业学报, 23, 1053–1060.]
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 230–238.
- Brookfield H, Stocking M (1999) Agrodiversity: Definition, description and design. *Global Environmental Change*, 9, 77–80.
- Cai YL (1996) Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture under global climate change. *Acta Geographica Sinica*, 51, 202–212. (in Chinese with English abstract) [蔡运龙 (1996) 全球气候变化下中国农业的脆弱性与应对策略. 地理学报, 51, 202–212.]
- Chen CB (2002) *In situ* conservation of genetic diversity in wild rice resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, (3), 53–57. (in Chinese with English abstract) [陈成斌 (2002) 试论野生稻资源遗传多样性原生境保存. 植物遗传资源科学, (3), 53–57.]
- Chen X (2017) Hazard and prevention of agricultural biodiversity by invasive alien organisms. *Modern Rural Technology*, 11, 31–32. (in Chinese) [陈兴 (2017) 外来生物入侵对农业生物多样性的危害及预防. 现代农村科技, 11, 31–32.]
- Chen X, Tang JJ, Wang ZQ (1999) The impacts of agricultural activities on biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 7, 75–80. (in Chinese with English abstract) [陈欣, 唐建军, 王兆骞 (1999) 农业活动对生物多样性的影响. 生物多样性, 7, 75–80.]
- Chen YS (2007) Effect and prevention countermeasures of the intrusive alien species on biological diversity. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 35, 1445–1446. (in Chinese with English abstract) [陈元胜 (2007) 外来物种入侵对生物多样性的影响及对策. 安徽农业科学, 35, 1445–1446.]

- Cingolani AM, Noy-Meir I, Díaz S (2005) Grazing effects on rangeland diversity: A synthesis of contemporary models. *Ecological Applications*, 15, 757–773.
- Collins WW, Qualset CO (1998) *Biodiversity in Agroecosystems*. CRC Press, Boca Raton.
- Conway GR (1987) The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 24, 95–117.
- Dan F, Wang KH, Dan H, Wang G (2022) Research hotspots and trends of agricultural cultural heritage. *World Agriculture*, (5), 108–118. (in Chinese with English abstract) [但方, 王堃, 但欢, 王刚 (2022) 农业文化遗产研究热点及趋势分析. *世界农业*, (5), 108–118.]
- De Steenhuijsen P, Peters B (1995) *Diversity of Fields and Farmers: Explaining yield variations in northern Cameroon*. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Deng CX, Guo FY, Huang DL, Li ZW (2021) Research on the impact of land use and landscape pattern on habitat quality in Dongting Lake area based on InVEST model. *Ecological Sciences*, 40(2), 99–109. (in Chinese with English abstract) [邓楚雄, 郭方圆, 黄栋良, 李忠武 (2021) 基于InVEST模型的洞庭湖区土地利用景观格局对生境质量的影响研究. *生态科学*, 40(2), 99–109.]
- Editorial Board of Agricultural Biodiversity Catalogue (2008) *Agricultural Area Biodiversity Inventory* (2nd vol.). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [农区生物多样性编目编委会 (2008) 农区生物多样性编目(下册). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Fahrig L, Baudry J, Brotons L, Burel FG, Crist TO, Fuller RJ, Sirami C, Siriwardena GM, Martin JL (2011) Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes: Heterogeneity and biodiversity. *Ecology Letters*, 14, 101–112.
- Fisher RA, Corbet AS, Williams CB (1943) The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *Journal of Animal Ecology*, 12, 42–58.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM (2011) *Principles and Application of Landscape Ecology*, 2nd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅伯杰, 陈利顶, 马克明 (2011) 景观生态学原理及应用(第2版). 科学出版社, 北京.]
- Gao LZ (1980) Agro-ecological economic system and Jiangsu Province agricultural modernization. *Jiangsu Agricultural Science*, (2), 5–8. (in Chinese) [高亮之 (1980) 农业生态经济系统与我省农业现代化. *江苏农业科学*, (2), 5–8.]
- Gao Y, Ren C, Liu Y, Zhu J, Li B, Mu W, Liu F (2021) Pepper-maize intercropping affects the occurrence of anthracnose in hot pepper. *Crop Protection*, 148, 105750.
- Guo HJ, Padoch C, Fu YN, Chen AG, Dao ZL (2000) Agrobiodiversity assessment and *in situ* conservation. *Acta Botanica Yunnanica*, (S1), 27–41. (in Chinese with English abstract) [郭辉军, Christine Padoch, 付永能, 陈爱国, 刀志灵 (2000) 农业生物多样性评价与就地保护. *云南植物研究*, (S1), 27–41.]
- Guo SB, Huang LL, Kang ZS, Cheng JJ, Lu NH, Yang ZW, Chen YC (2009) Efficacy and mechanism of control of wheat stripe rust by diversifying cultivars in mix-planting. *Chinese Agricultural Science*, 42(10), 3485–3492. (in Chinese with English abstract) [郭世保, 黄丽丽, 康振生, 程晶晶, 陆宁海, 杨之为, 陈银潮 (2009) 小麦多品种混播控制条锈病的效果和机理研究. *中国农业科学*, 42(10), 3485–3492.]
- Gurr GM, Wratten SD, Luna JM (2003) Multi-function agricultural biodiversity: Pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, 4, 107–116.
- Hang J, Shi Y, An JJ, He DH (2016) Selection of microhabitat of carabid beetles (Coleoptera: carabidae) in different ecological restored habitats in the hilly and gully area of Loess Plateau, Ningxia, China. *Forestry Science*, 52(1), 71–79. (in Chinese with English abstract) [杭佳, 石云, 安婧婧, 贺达汉 (2016) 宁夏黄土丘陵区不同生态恢复生境中步甲对微生境的选择. *林业科学*, 52(1), 71–79.]
- Hang J, Shi Y, Liu WH, He DH (2014) Diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) in restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia Hui Autonomous Region. *Biodiversity Science*, 22, 516–524. (in Chinese with English abstract) [杭佳, 石云, 刘文惠, 贺达汉 (2014) 宁夏黄土丘陵区不同生态恢复生境地地表甲虫多样性. *生物多样性*, 22, 516–524.]
- He YT, Qi YC, Dong YS, Peng Q, Xiao SS, Liu XC (2010) Advances in the influence of external nitrogen input on soil microbiological characteristics of grassland ecosystem. *Advances in Earth Science*, 25, 877–885. (in Chinese with English abstract) [何亚婷, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 肖胜生, 刘欣超 (2010) 外源氮输入对草地土壤微生物特性影响的研究进展. *地球科学进展*, 25, 877–885.]
- Jones A, Dukes PD, Cuthbert FP (1976) Mass selection in sweet potato: Breeding for resistance to insects and diseases and for horticultural characteristics. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 101, 701–704.
- Li JM (2010) Biodiversity investigation in agricultural area of plain—Take Hengshui area as an example. *Journal of Hengshui University*, 12(1), 54–56. (in Chinese with English abstract) [李建明 (2010) 平原农业区生物多样性变化趋势调查——以衡水为例. *衡水学院学报*, 12(1), 54–56.]
- Li Q, Zhou Y, Cunningham MA, Xu T (2021) Spatio-temporal changes in wildlife habitat quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1980 to 2100 based on the InVEST model. *Journal of Resources and Ecology*, 12, 43–55.
- Li YQ, Han L, Zhu HL, Zhao YH, Liu Z, Chen R (2020) Changes of ecological service value in Yan'an City pre and post returning farmland to forestland based on land use. *Journal of Northwest Forestry University*, 35(1), 203–211. (in Chinese with English abstract) [李蕴琪, 韩磊, 朱会利, 赵永华, 刘钊, 陈芮 (2020) 基于土地利用的延安市退耕还林前后生态服务价值变化. *西北林学院学报*, 35(1), 203–211.]
- Li ZF, Gao JX (2018) A review on assessment methods of biodiversity. *China Development*, 18(2), 1–13. (in Chinese with English abstract) [栗忠飞, 高吉喜 (2018) 生物多样性评估方法的综述与评价. *中国发展*, 18(2), 1–13.]
- Lindeman RL (1942) The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 23, 399–417.

- Liu CJ, Zhou GF, Huang QF, Cai XF (2021) Spatio-temporal evolution analysis on habitat quality in mountainous watershed based on InVEST model: Case of Chishui River Basin in Guizhou Province. *Yangtze River*, 52(10), 62–69. (in Chinese) [刘纯军, 周国富, 黄启芬, 蔡雄飞 (2021) 基于InVEST模型的山地流域生境质量时空分异研究——以贵州省境内赤水河流域为例. *人民长江*, 52(10), 62–69.]
- Liu JJ, Cui HA, Wang DX, Xia WH, Yang ZL (2002) The diversity changes and the natural restoring on vegetation of the returned farmland in Zhangliang experiment area in Yan'an City. *Journal of Northwest Forestry University*, 17, 8–11. (in Chinese with English abstract) [刘建军, 崔宏安, 王得祥, 夏文辉, 杨正礼 (2002) 延安市张梁试区退耕地植被自然恢复与多样性变化. *西北林学院学报*, 17, 8–11.]
- Liu Y, Zhang J, Zhou DM, Ma J, Dang R, Ma JJ, Zhu XY (2021) Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River basin based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 4052–4065. (in Chinese with English abstract) [刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕 (2021) 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. *生态学报*, 41, 4052–4065.]
- Liu YC, Yang T, Luo W (2014) Discussion on the protection of agricultural ecological environment in Changde. *Crop Research*, 28, 714–716. (in Chinese) [刘玉春, 杨涛, 罗伟 (2014) 常德农业生态环境保护问题刍议. *作物研究*, 28, 714–716.]
- Liu YH, Chang H, Yu ZR (2010) General principles for biodiversity protection in agro-landscaping. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26, 622–627. (in Chinese with English abstract) [刘云慧, 常虹, 宇振荣 (2010) 农业景观生物多样性保护一般原则探讨. *生态与农村环境学报*, 26, 622–627.]
- Liu YH, Yu ZR, Luo M (2021) Strategies for biodiversity conservation in agricultural landscape during land rehabilitation and ecological restoration. *Earth Science Frontiers*, 28(4), 48–54. (in Chinese with English abstract) [刘云慧, 宇振荣, 罗明 (2021) 国土整治生态修复中的农业景观生物多样性保护策略. *地学前缘*, 28(4), 48–54.]
- Liu YH, Zhang X, Zhang XZ, Duan MC (2012) Eco-agricultural landscape for biodiversity conservation and ecological service maintenance. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 20(7), 819–824. (in Chinese with English abstract) [刘云慧, 张鑫, 张旭珠, 段美春 (2012) 生态农业景观与生物多样性保护及生态服务维持. *中国生态农业学报*, 20(7), 819–824.]
- Lu BY, Jiang GJ (2001) Structural diversity and sustainability of agro-ecosystem at village level. *Agricultural Environmental Protection*, 20, 145–147. (in Chinese with English abstract) [卢兵友, 蒋广洁 (2001) 村级农业生态系统结构多样性与系统可持续性研究. *农业环境保护*, 20, 145–147.]
- Luo SY (2011) The ecological farming thought in Chinese traditional agriculture. *Journal of Dialectics of Nature*, 33, 47–52, 124. (in Chinese with English abstract) [罗顺元 (2011) 论中国传统农业的生态耕作思想. *自然辩证法通讯*, 33, 47–52, 124.]
- Luo Y (2022) Ecological folklore inheritance promotes biodiversity protection—A fieldwork case of Pumi people in Lanping County. *Cultural Heritage*, (2), 142–150. (in Chinese) [罗瑛 (2022) 生态民俗传承促进生物多样性保护——以兰坪县普米族田野调查为例. *文化遗产*, (2), 142–150.]
- Luo YZ (1995) Biodiversity and integrated pest management. *World Agriculture*, 10, 26–27. (in Chinese) [罗益镇 (1995) 生物多样性与害虫的综合防治. *世界农业*, 10, 26–27.]
- Lv YH, Chen LD, Fu BJ (2007) Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes. *Progress in Geography*, 26, 1–10. (in Chinese with English abstract) [吕一河, 陈利顶, 傅伯杰 (2007) 景观格局与生态过程的耦合途径分析. *地理科学进展*, 26, 1–10.]
- MEE (Ministry of Ecology and Environment) (2021) 2020 China Ecological Environment Status Bulletin 2020 (Excerpt). *Environmental Protection*, 49, 47–68. (in Chinese) [生态环境部 (2021) 2020年中国生态环境状况公报(摘录). *环境保护*, 49, 47–68.]
- Nagy GG, Ladányi M, Arany I, Aszalós R, Czúcz B (2017) Birds and plants: Comparing biodiversity indicators in eight lowland agricultural mosaic landscapes in Hungary. *Ecological Indicators*, 73, 566–573.
- Song XZ, Wang C, Peng ZH, Yang H (2007) Diverse ecosystem services and complex agricultural ecosystem. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 38, 81–85. (in Chinese with English abstract) [宋绪忠, 王成, 彭镇华, 杨华 (2007) 生态系统服务功能多样性与农业生态系统复杂性. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 38, 81–85.]
- Sun B, Liang Y, Xu RK, Peng XH, Wang XX, Zhou J, Li ZP, Zhao XQ (2018) Long-term research on red soil degradation and remediation promotes development of ecological recycling agriculture in hilly region of Southeast China. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 33, 746–757. (in Chinese with English abstract) [孙波, 梁音, 徐仁扣, 彭新华, 王兴祥, 周静, 李忠佩, 赵学强 (2018) 红壤退化与修复长期研究促进东南丘陵区生态循环农业发展. *中国科学院院刊*, 33, 746–757.]
- Sun CZ, Yan XL (2014) Driving mechanism analysis of landscape pattern change in the lower reach of Liaohe river plain based on GIS-Logistic coupling model. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 7280–7292. (in Chinese with English abstract) [孙才志, 闫晓露 (2014) 基于GIS-Logistic耦合模型的下辽河平原景观格局变化驱动机制分析. *生态学报*, 34, 7280–7292.]
- Sun XJ (2012) An introduction to agroecosystems and their influencing factors. *Heilongjiang Science and Technology Information*, (32), 249. (in Chinese) [孙祥军 (2012) 浅谈农业生态系统及其影响因素. *黑龙江科技信息*, (32), 249.]
- Tang CF, Zhang EL, Li WF, Zhang FF, Dong C, A XX, Chen D, Xu MH, Dai LY (2015) Investigation of agro-biological resources and comparative analysis on species diversity in Zhenfeng and Songtao County, Guizhou Province. *Journal of Plant Genetic Resources*, 16, 976–985. (in Chinese with English abstract) [汤翠凤, 张恩来, 李卫芬, 张斐斐, 董

- 超, 阿新祥, 陈丹, 许明辉, 戴陆园 (2015) 贵州省贞丰县和松桃县农业生物资源调查及物种多样性比较分析. 植物遗传资源学报, 16, 976–985.]
- Tang JJ, Chen X (2001) A mini review to integrated biodiversity management (IBM) in agroecosystem. In: The 6th National Youth Academic Conference on Management Science and System Science and the Satellite Session of the 4th Annual Youth Academic Conference of the Chinese Association for Science and Technology (ed. Hu XP), pp. 459–466. Dalian University of Technology Press, Dalian. (in Chinese with English abstract) [唐建军, 陈欣 (2001) 浅论农业生态系统中生物多样性的综合管理. 见: 第6届全国青年管理科学与系统科学学术会议暨中国科协第4届青年学术年会卫星会议(胡祥培主编), 459–466页. 大连理工大学出版社, 大连.]
- Tang JJ, Pan XL (1997) A comparative study on the physiological characteristics of drought tolerance of intergeneric hybrid rice and its parents under simulated stress. Journal of Xinjiang University (Natural Sciences Edition), (4), 82–86. (in Chinese with English abstract) [唐建军, 潘晓玲 (1997) 属间远缘杂交水稻耐旱性生理特性的比较研究. 新疆大学学报(自然科学版), (4), 82–86.]
- Tansley AG (1935) The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology, 16, 284–307.
- Tao Z (1977) Strengthening agricultural environment research is an urgent requirement for developing agriculture. Environmental Science Developments, (23), 2–9. (in Chinese) [陶战 (1977) 加强农业环境研究是发展农业的迫切要求. 环境科学动态, (23), 2–9.]
- Tscharntke T, Clough Y, Wanger TC, Jackson L, Motzke I, Perfecto I, Vandermeer J, Whitbread A (2012) Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. Biological Conservation, 151, 53–59.
- Tucker G, McConville A, McCoy K, Brink PT (2009) Scenarios and Models for Exploring Future Trends of Biodiversity and Ecosystem Services Changes. Final report to the European Commission, DG Environment on Contract. <https://edepot.wur.nl/90914>. (accessed on 2023-01-11)
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2020) The Global Biodiversity Outlook 5 (GBO-5). <https://www.unep.org/resources/report/global-biodiversity-outlook-5-gbo-5>. (accessed on 2023-01-11)
- Wang CY, Wang G, Wan SW, Qin P (2007) Effects of organic and conventional farming systems on farmland biodiversity. Journal of Ecology and Rural Environment, 23, 75–80. (in Chinese with English abstract) [王长永, 王光, 万树文, 钦佩 (2007) 有机农业与常规农业对农田生物多样性影响的比较研究进展. 生态与农村环境学报, 23, 75–80.]
- Wang Y, Yuan HJ, Xu YL, Peng YL (2013) Investigation on the diversity of wild plant resources in Changde farmland. Guizhou Agricultural Sciences, 41(2), 33–38. (in Chinese with English abstract) [王云, 袁红娟, 许玉良, 彭友林 (2013) 常德市农田野生植物资源多样性的调查. 贵州农业科学, 41(2), 33–38.]
- Wang YL, Xue DY (2015) The effect of Pumi's traditional culture and resources management methods on their forest biodiversity. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition), 24(4), 41–47. (in Chinese with English abstract) [王云靓, 薛达元 (2015) 普米族传统文化与资源管理方式对当地森林生物多样性的影响. 中央民族大学学报(自然科学版), 24(4), 41–47.]
- Wen DZ (1995) A primary discussion on agroecosystem diversity. Chinese Journal of Applied Ecology, 6, 97–103. (in Chinese with English abstract) [闻大中 (1995) 试论农业生态系统的多样性. 应用生态学报, 6, 97–103.]
- Williams CB (1944) Some applications of the logarithmic series and the index of diversity to ecological problems. Journal of Ecology, 32, 1–44.
- Xiao GJ, Zhang QQ, Wang J (2007) Impact of global climate change on agro-ecosystems. Chinese Journal of Applied Ecology, 18, 1877–1885. (in Chinese with English abstract) [肖国举, 张强, 王静 (2007) 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. 应用生态学报, 18, 1877–1885.]
- Xin X, Yin GK, He JJ, Lu XX (2022) Progress on long-term safe conservation of crop germplasm resources at National Crop Genebank. China Basic Science, 24(5), 24–29. (in Chinese with English abstract) [辛霞, 尹广鹏, 何娟娟, 卢新雄 (2022) 国家作物种质库资源长期安全保存进展. 中国基础科学, 24(5), 24–29.]
- Xu JM, Wen DZ, Luo LG, Luo QS (1997) Farm ecosystem diversity in typical agricultural regions of China. Chinese Journal of Applied Ecology, 8, 37–42. (in Chinese with English abstract) [许健民, 闻大中, 罗良国, 罗启仕 (1997) 我国主要类型农业地区农田生态系统多样性的研究. 应用生态学报, 8, 37–42.]
- Xu L, Wang JM, Feng K, Cai YF, Li B, Yin HH, Li DF, Zhou LC, Ma Y, Wang G, Liu PC, Li RT, Zhou CH, Yang K, Chen J (2015) Biodiversity risk and opportunity assessment in BAT leaf co-operative areas. Journal of Anhui Agricultural Science, 43(28), 86–87, 172. (in Chinese with English abstract) [许龙, 王敬明, 冯坤, 蔡硯发, 李斌, 殷红惠, 李大肥, 周炼川, 马莹, 王刚, 刘鹏程, 李润涛, 周长华, 杨科, 陈剑 (2015) 英美烟草合作烟区生物多样性风险与机遇评估. 安徽农业科学, 43(28), 86–87, 172.]
- Xue JM, Li RD, Shao ZX, Wang XP, Huang JY, Yang L, Wei HB, Wu ZL (2014) Hengshui Lake ecological environment status and bioremediation effect. Hebei Fisheries, (12), 61–64. (in Chinese) [薛建民, 李瑞达, 邵泽轩, 王相盼, 黄金义, 杨莉, 魏洪彪, 武泽雷 (2014) 衡水湖生态环境现状及生物修复效果. 河北渔业, (12), 61–64.]
- Xue K, Yuan MM, Shi ZJ, Qin YJ, Deng Y, Cheng L, Wu LY, He ZL, Van Nostrand JD, Bracho R, Natali S, Schuur EAG, Luo CW, Konstantinidis KT, Wang Q, Cole JR, Tiedje JM, Luo YQ, Zhou JZ (2016) Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming. Nature Climate Change, 6, 595–600.
- Yang QW, Zhang WX, He DX, Chen DZ, Dai LY, Chen CB, Huang KD (2003) Studies on *in situ* conservation methods of wild rice in China. Journal of Plant Genetic Resources, 4, 63–67. (in Chinese with English abstract) [杨庆文, 张万霞, 贺丹霞, 陈大洲, 戴陆元, 陈成斌, 黄坤德 (2003) 中国野生稻原生境保护方法研究. 植物遗传资源学报, 4, 63–67.]
- Yang SH, Song TQ, Chen HJ, Ouyang ZF (2010) The impact

- of modern agricultural production methods and technology systems on the ecological environment. *Agricultural Environment and Development*, 27(1), 1–7. (in Chinese) [杨曙辉, 宋天庆, 陈怀军, 欧阳作富 (2010) 现代农业生产方式与技术体系对生态环境的影响. *农业环境与发展*, 27(1), 1–7.]
- Yuan CY (1995) Productivity and diversity indices for evaluating agricultural economic system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6, 137–142. (in Chinese with English abstract) [袁从祎 (1995) 农业生态经济系统生产力与多样性评价指标. *应用生态学报*, 6, 137–142.]
- Zeng XS (2011) Agro-biodiversity and sustainable development of China's agriculture. *Journal of Poyang Lake*, (5), 54–66. (in Chinese with English abstract) [曾雄生 (2011) 农业生物多样性与中国农业的可持续发展(上). *鄱阳湖学刊*, (5), 54–66.]
- Zhang F, Zhou ZX (2010) Dynamic assessment of agro-ecological system based on energy analysis in Yan'an City. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 28, 251–257. (in Chinese with English abstract) [张芳, 周忠学 (2010) 基于能值分析的延安市农业生态系统动态评估. *干旱地区农业研究*, 28, 251–257.]
- Zhang JE (1999) Present situation, loss causes and conservation of agricultural biodiversity in China. *Rural Eco-Environment*, 15(2), 36–40. (in Chinese with English abstract) [章家恩 (1999) 中国农业生物多样性及其保护. *农村生态环境*, 15(2), 36–40.]
- Zhang NM, Zeer LD, Chen WH, Zhang JL, Ma X, Hu CL (2021) Traditional ecological culture of ethnic minorities and biodiversity conservation in Yunnan. In: *Biodiversity Research* (ed. Zhong M), pp. 500–505. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese with English abstract) [张乃明, 泽尔拉都, 陈文华, 张继来, 马珣, 胡成磊 (2021) 云南少数民族传统生态文化与生物多样性保护. 见: *生物多样性研究* (钟敏主编), 500–505页. 云南科技出版社, 昆明.]
- Zhang Y (2022) Research on the integrated development of agricultural cultural heritage and cultural tourism industry. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, (2), 59–60. (in Chinese with English abstract) [张阳 (2022) 农业文化遗产与文化旅游产业融合发展研究. *农业科技与装备*, (2), 59–60.]
- Zhao JC, Wang ZJ, Li L (2005) *Higher Plant Catalogue of Hebei*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵建成, 王振杰, 李琳 (2005) *河北高等植物名录*. 科学出版社, 北京.]
- Zhao TT, Zhang FR, Niu ZG, Jiang GH (2009) Analysis of farm land landscape pattern evolvement in Shunyi district, Beijing City. *Areal Research and Development*, 28(3), 106–111. (in Chinese with English abstract) [赵婷婷, 张凤荣, 牛振国, 姜广辉 (2009) 北京市顺义区农田景观格局变化研究. *地域研究与开发*, 28(3), 106–111.]
- Zheng DS (2005) General situation and proposition of *in situ* conservation of agricultural wild plants in China. *Chinese Wild Plant Resources*, 24(3), 17–18, 22. (in Chinese with English abstract) [郑殿升 (2005) 中国农业野生植物原生境保护现状及建议. *中国野生植物资源*, 24(3), 17–18, 22.]
- Zheng XM, Yang QW (2021) Progress of agricultural biodiversity conservation in China. *Biodiversity Science*, 29, 167–176. (in Chinese with English abstract) [郑晓明, 杨庆文 (2021) 中国农业生物多样性保护进展概述. *生物多样性*, 29, 167–176.]
- Zhou J, Yang M, Wen XY, Li N, Ren H (2021) Strengthen *ex situ* conservation of plants and promote protection and utilization of plant resources. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 36, 417–424. (in Chinese with English abstract) [周桔, 杨明, 文香英, 李楠, 任海 (2021) 加强植物迁地保护, 促进植物资源保护和利用. *中国科学院院刊*, 36, 417–424.]

(责任编辑: 龙春林 责任编辑: 李会丽)

附录 Supplementary Material

附录1 国外现有生态系统多样性主要的景观研究方法和研究指标

Appendix 1 Main landscape research methods and research indicators of existing ecosystem diversity abroad
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2023017-1.pdf>

附录2 国内现有生态系统多样性主要的景观研究方法和研究指标

Appendix 2 Main landscape research methods and research indicators for ecosystem diversity available in China
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2023017-2.pdf>

附录3 国外现有生态系统多样性主要的规划区域研究方法和研究指标

Appendix 3 Main planning area research methods and research indicators for existing ecosystem diversity abroad
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2023017-3.pdf>

附录4 国内现有生态系统多样性主要的规划区域研究方法和研究指标

Appendix 4 Main planning area research methodologies and research indicators for ecosystem diversity available in China
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2023017-4.pdf>