

光伏与农业结合的相关研究综述

王玲俊^{1,2}, 陈健^{3*} (1.南京工程学院经济与管理学院, 江苏南京 211167; 2.南京工程学院产业经济与创新管理研究院, 江苏南京 211167; 3.南京林业大学经济管理学院, 江苏南京 210037)

摘要 搜集了光伏与农业结合的相关文献, 将其梳理为 3 个方面: 光伏在农业中的应用、农光互补和光伏农业, 进而对这 3 个方面的研究进行了综述。研究发现, 光伏在农业中的应用主要用于解决农业生产中的能源短缺以及绿色生产等问题; 农光互补则不同, 它更加注重光伏发电与农业生产的相互影响、竞合关系以及耦合共生; 而光伏农业是我国特有的提法, 其含义包括光伏在农业中的应用和农光互补 2 个方面。未来的研究可从产业共生视角进行, 分析光伏产业与农业共生融合的经济、社会和环境效应。

关键词 光伏; 农业生产; 农光互补; 光伏农业

中图分类号 F303.2 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)18-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.18.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Review of Related Research on the Integration of Photovoltaic and Agriculture

WANG Ling-jun^{1,2}, CHEN Jian³ (1. School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167; 2. Institute of Industrial Economy and Innovation Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167; 3. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037)

Abstract This article collected relevant literature on the integration of photovoltaic and agriculture, and sorted them into three aspects: the application of photovoltaic in agriculture, agrivoltaic and photovoltaic agriculture, and then reviewed the research in these three aspects. We found that the application of photovoltaic in agriculture is mainly used to solve the problems of energy shortage and green production in agricultural production. Agrivoltaic is different. It pays more attention to the mutual influence, competition and cooperation, and coupling symbiosis between photovoltaic power generation and agricultural production. And photovoltaic agriculture is a unique formulation in China, and its meaning includes the application of photovoltaic in agriculture and agrivoltaic. Future research can be conducted from the perspective of industrial symbiosis to analyze the economic, social and environmental effects of the symbiosis and integration of photovoltaic industry and agriculture.

Key words Photovoltaic; Agricultural production; Agrivoltaic; Photovoltaic agriculture

全球气候变暖和化石资源枯竭促使人类不断寻求可再生的绿色能源, 太阳能资源由于具有安全、便利等特点, 其利用受到了各国关注^[1], 其中以光伏发电这一形式最为普遍。另外, 世界人口的持续增长需要农业生产出更多的粮食, 这也意味着更多的电力消耗。光伏发电如能应用到农业部门, 既可保障粮食安全, 又可达到环境保护和资源节约等目的。事实上, 早在 20 世纪 60 年代, 英国、法国、印度、葡萄牙和美国等国的有关实验室就开展了太阳能在农业中应用的相关研究, 应用方面包括农产品和木材烘干、养殖棚的空气调节等^[2]。随着光伏技术的出现, 太阳能光伏在农业中的应用逐渐受到了关注, 1975 年首台光伏水泵面世开启了光伏与农业结合的历程^[3]。在此之后, 光伏在农业中的应用逐渐呈现出多样化的态势, 从刚开始的农业灌溉到现在的照明、通风、农业机械、农业自动化和农业机器人等^[4]。此外, 为了达到光伏发电在电力供应总量中占比不断提升的目标, 许多国家都积极投身于光伏电站的建设中。然而, 作为光伏电站主要形式的地面光伏电站, 其建设需要投入大片土地, 土地资源成为光伏产业发展的一大限制因素。鉴于此, 有学者提出了农光互补 (agrivoltaic 或 agrophotovoltaic), 也即一地两用, 在同一土地上既进行农业生产又进行光伏发电。此后, 农光互补

在世界范围内开展了很多项目实践, 成为光伏与农业结合的第 2 种形式。在光伏与农业结合现象出现的 40 多年里, 很多学者对这一现象进行了研究, 并取得了丰硕的研究成果, 但此领域的综述文献并不多见。笔者搜集了光伏与农业结合的相关文献, 对其进行了梳理及综述, 并对该领域未来的研究进行了展望。

1 光伏在农业中的应用

航空航天是光伏技术的最早应用领域, 而较早对光伏在农业中应用进行的研究正是发起于这一领域。美国航空宇航局 (NASA) 的 Lewis 研究中心于 1980—1981 年发起了一项针对光伏发电系统在农业部门中应用的全球市场预测研究。出于农业部门的经济重要性、能源状况、电气化程度、太阳能资源和地域代表性等方面因素的考虑, 该研究选择了尼日利亚、摩洛哥、哥伦比亚、墨西哥和菲律宾为调查对象, 分析了美国光伏产品国际营销的障碍, 并提出了相关建议^[5]。随后的一段时间内, 学者主要关注了太阳能光伏在农业中应用的障碍, 这些障碍主要来自经济、制度和社会 3 个方面^[6]。由于这些障碍的存在, 20 世纪 90 年代论及光伏在农业中应用的文献很少。正如 Katzman 等^[7]所预测的那样, 无论是从成本效益角度还是商业可行角度, 光伏在农业中的最佳应用时机应在 2000 年之后。进入 21 世纪, 虽然初期仍有文献提到了光伏在农业中的应用障碍这一问题, 如 Radulovic^[8]在研究如何促进光伏在印度农业部门中的应用时, 提出了要克服“政治障碍”这一建议, Mousazadeh 等^[9]在相关研究中也对“替换成本障碍”这一问题进行了分析。但很多学者对光伏在农业中的应用有着乐观的预期, 认为太阳能的开发与利用

基金项目 南京工程学院产业经济与创新管理研究院开放基金项目 (JGKC202002); 南京工程学院高层次引进人才科研启动基金项目 (YKJ202024); 江苏省社会科学基金项目 (20GLD010)。

作者简介 王玲俊 (1984—), 女, 江苏丹阳人, 副教授, 博士, 从事产业组织与产业政策、光伏农业研究。* 通信作者, 讲师, 博士, 从事产业经济与管理、光伏农业研究。

收稿日期 2021-01-17

可以促进全球可持续农业和农村发展^[10],并且在智能生态农业中有很好的应用前景^[11]。与此同时,除了在农业灌溉中的应用,光伏在农业中的应用呈现出多样化趋势,有农业温室系统、农产品储存、农业电动车和农场照明等。

1.1 光伏在农业灌溉中的应用 光伏与农业的结合最早出现在农业灌溉领域,Katzman 等^[7]以美国的内布拉斯加州和得克萨斯州为例,结合燃料成本等因素对太阳能光伏灌溉系统的成本效益和商业可行性进行了分析。无独有偶,我国在论及光伏在农业中的应用时,最早也是在农业灌溉方面。吴永忠等^[12]结合我国西北地区干旱少雨以及太阳能资源丰富的自然条件,分析了该地区对光伏提水的需求,提出可在西部大开发中应用光伏提水,从而在保证农业生产的同时达到节能、环保、扶贫和经济社会的可持续发展等目的。盛锋等^[13]对光伏水泵系统在农业方面的应用前景进行了分析,认为该系统的应用,尤其是在一些干旱地区的应用,如我国的西北部地区、新疆南疆地区等,可以实现巨大的经济社会效益。在此之后,很多学者对光伏灌溉系统进行了进一步的技术与经济分析^[14-15],并有学者认为该系统应用的经济性需结合应用地点和作物种类等进行综合考虑^[16]。类似地,Campana 等^[17]对我国牧草光伏灌溉系统的最佳选址进行了研究,认为最佳应用区域受以下几个因素的影响,如增加的牧草潜在产量、牧草管理成本、牧草需水量、地下水深度、牧草价格和二氧化碳价格等。此外,光伏灌溉系统不仅能满足农业生产对水的需求,同时能实现对灌溉系统的智能化管理^[18]。总体而言,虽然对光伏灌溉系统的应用仍存在一些争论^[19],但在一些干旱地区,尤其是一些能源短缺并主要依靠农业生存和发展的地区,如中东和非洲等地区的农业国家,应用光伏灌溉系统可在有效缓解能源短缺的同时促进农业生产。

1.2 光伏在农业温室系统中的应用 随着人口增长和城市化进程的加快,人类对食物的需求迅速增加,而粮食产量的提高很大程度上取决于诸如农业温室系统这类高效园艺技术的应用^[20]。对于农业温室作物的生产而言,最大的成本来自为控制环境温度而耗费的能源,而就对环境的影响而言,光伏可为农业温室生产提供绿色可持续的能源^[21]。Saini 等^[22]对不同种类的光伏技术应用于农业温室系统进行了环境经济分析,结果发现,铜铟镓硒(CIGS)光伏技术的投资回收期较短,而且碳排放量最少,具有较好的环境效应。Yano 等^[23]研究发现,采用透明和半透明的光伏板,可增加进入温室大棚的光照量。Hassanien 等^[24]对采用半透明光伏板的温室大棚使用情况进行了调查,并研究了大棚内番茄的生长情况和生长环境,结果发现,晴天情况下,光伏组件的遮阴会使大棚内温度下降 1~3 ℃,但对相关湿度没有显著影响;这类系统的投资回收期为 9 年。

1.3 光伏在农业其他方面的应用 除了以上 2 个方面,以光伏技术为基础的光伏制冷系统可用于粮食储存,同时,光伏也可用于农产品烘干^[25]。光伏系统还可应用于农用机械。Xue^[26]分别计算了 10 和 30 kW 光伏农用电动车的投资回收

期、净现值和效益成本率,并与各自型号的拖拉机进行了对比,结果表明,低功率的光伏农用电动车是明智及经济的投资选择,尽管初始投资成本较高,但这种电动车特别适合我国的农村和偏远地区。事实上,由于农用机械主要应用柴油发动机,这一动力系统的耗油量大,环境污染严重,光伏发电系统在农机中的应用具有较好的前景^[27]。此外,光伏还可以用于农业照明^[28],对于边远地区而言,这一方式的意义尤为重大^[29]。最后,还有很多其他方面的应用正在逐渐开发,如作物保护^[30]、农业自动化^[31]等。

综上所述,光伏在农业中的应用主要用于解决农业生产中的能源短缺以及绿色生产等问题,而随着光伏技术的发展,其应用成本得以下降,相较于传统的化石能源,光伏在农业中的应用更具经济优势,最终会促进光伏在农业中的进一步发展。

2 农光互补

农光互补,也被称为农光一体化,是指在同一土地上既进行光伏发电又进行农业生产,其强调的是一地两用。因此,与光伏在农业中的应用不同,农光互补更加注重光伏发电与农业生产的相互影响、竞合关系以及耦合共生。

2.1 光伏温室 Wang 等^[32]在回顾我国现代温室和太阳能产业发展概况的基础上提出了温室系统与光伏发电的整合方案,进而介绍了我国各地已实施的光伏农业温室工程项目;并以新疆的光伏农业温室项目为例,对其进行了经济效益分析,发现项目的投资回收期为 8.7 年,如果考虑光伏系统的价格下降,则投资回收期可进一步缩短;该研究揭示了我国光伏温室系统中存在的问题,主要包括缺少产业标准、补贴困境和技术障碍;最后指出,发展先进的光伏技术可以更好地蓄热,并实现光伏发电和光利用的平衡,从而促进现代光伏农业温室系统的进一步发展。同样是基于国内的情况,Li 等^[33]研究指出我国近年来农光互补项目数量猛增,进而对 5 种不同类型的光伏农业温室系统进行了经济和社会效益分析,发现它们的年投资回报率为 9%~20%,投资回收期为 4~8 年;并且,这些系统的应用能带来巨大的社会效益,如提供就业、增加税收和二氧化碳减排;进一步的敏感性分析发现,在包括上网电价的众多因素中,光伏农业温室系统的经济效益对作物价格最为敏感;光伏农业公司应重点关注作物种植,而政策制定者则应将激励从光伏电力生产转向农业作物生产。由于光伏系统的应用会对作物产量产生一定的影响,很多学者就如何提高光伏温室系统中作物的产量进行了技术方面的研究,并提出了相关的技术解决方案。例如,Allardyce 等^[34]针对传统的不透明光伏板提出的半透明光伏板,Moretti 等^[35]提出的移动光伏板系统等。

2.2 光伏种植与光伏养殖 早在 1982 年,Goetzberger 等^[36]便提出了太阳能转化和作物种植可以共存(coexistence)这一想法,而在此之前,用于太阳能转化的土地被认为无法作为他用;这里的共存特指对太阳能发电装置进行改造,使土地能同时用于作物种植;具体的做法是将太阳能集热器提高到地面上方 2 m,并增加它们之间的间距,以避免对作物造成过

度遮挡;这些光伏系统仅占用了 1/3 的土地和光照资源,并且进一步的技术改进可以提高其在作物生产中的适用性。大约过了 30 年,这一想法才被表述为“agrivoltaic”,并在世界范围开始了大规模的实践^[37]。法国国家农业科学研究院(INRA)的 Dupraz 等^[38]首次提出了上述概念,该研究团队在蒙彼利埃附近建立了第一个光伏农场,并在农场中的 4 个相邻的地块种植了同一种作物,其中 2 个在全日照下(作为对照),另外 2 个分别在标准密度和半密度的光伏板阵列下,结果发现,光伏板的架设遮挡了作物生产所需的阳光,从而降低了作物产量;光伏板遮阴减少了蒸腾作用,并可能提高水利用效率,关键是要在光伏电力生产和作物生产之间找到平衡。之后,该团队中的 Marrou 等^[39-41]沿着上述思路进行了后续研究,发现光伏板的架设确实可以减少作物中水的蒸散,从而增加作物产量,但需要选择合适的作物品种,如生菜等喜阴作物。与此同时,其他学者对上述应用的前景进行了乐观预估。Harinarayana 等^[42]认为“agrivoltaic”的想法在印度可以顺利得以实施。在德国,由于 agrivoltaic 对土地双重利用的方式不会减少作物种植面积,人们会乐于接受它^[43]。而在美国的凤凰城都市统计区,上述想法的应用既可以满足社会对清洁电力的需求,又可以起到保护周围农业生产用地的作用,可以在该地区引进此类项目^[44]。上述“agrivoltaic”特指农业种植与光伏发电在同一土地上的共生融合,除此之外,还有农业养殖与光伏发电的结合,如“aquavoltaic”^[45],特指水产养殖与光伏发电的结合。

2.3 农光互补的相关效应 很多学者都认为农光互补是满足农业生产能源需求和实现农业绿色生产的较好选择。由于技术进步,各种农业光伏技术在经济上的不确定性已大大降低,许多研究已证明了这些技术在经济上是具有可行性的^[16,21,46]。不仅如此,其社会效应^[33]和环境效应^[20,22,47]也得到了证实。

2.3.1 经济效应。Dinesh 等^[46]通过计算证实,如果选择合适的农作物,同时将遮荫效应造成的产量损失降至最低,农光互补可以使农场的收入增加 30% 以上。Dupraz 等^[38]用土地当量比来衡量农光互补系统相对于单独光伏系统在产量方面的优势,模拟显示,在农光互补系统中,整体的土地当量比可以提高 70%。而 Amaducci 等^[48]研究表明,与单独生产玉米并使用地面安装的光伏组件单独生产能源相比,农光互补可以将可再生能源的土地生产率提高 1 倍。Malu 等^[49]通过对印度葡萄农场应用光伏系统的技术经济分析,认为安装光伏系统的葡萄农场的经济价值可能增长 15 倍以上。还有学者基于案例研究了 5 种不同类别光伏温室系统的经济绩效,认为该类系统可以取得良好的经济绩效,它们的年投资回报率(AROI)为 9%~20%;根据不同的光伏温室生产农作物,投资回收期为 4~8 年^[33]。

2.3.2 社会及环境效应。除了经济效应,农光互补系统还能带来可观的社会环境效应。Li 等^[33]对位于山东即墨光伏农业园的昌盛日电公司进行了调查研究,通过对公司管理人员和普通员工进行访谈,获得了光伏农业温室系统有关社会效

应的信息,具体而言,光伏温室可以增加税收和提供就业,每个岗位大约有 3 万元的年收入。Leon 等^[50]以光伏与番茄种植结合的系统为例,对农光互补系统的 CO₂ 排放量进行了测量,发现该系统 CO₂ 排放量小于传统的农业生产系统;农光互补系统具有土地共享、阳光共享和发电等功能,这些新功能的体现需要对传统的功能单元进行改变,或提出新的功能单元;对原有以土地面积为基础的功能单元进行了修改,并提出了以货币为基础的功能单元,从而解决了该系统中光伏与农业子系统作为不同市场商品生产者,两者产出不能相加的问题;指出传统和新型功能单元的结合有助于保持对农用土地作物生产功能的关注,并能更好地理解农光互补系统对环境的影响。此外,农光互补系统的环境效应不仅体现在温室气体减排上,还会引发干旱地区农业生产的协同效应^[37];比如,农光互补系统可以避免土壤中水分的过度蒸发^[44,51],进而有利于作物生长,甚至起到水土保持、防止土地荒漠化等作用。

3 光伏农业

彭梅牙^[52]较早提出了这一概念,认为光伏农业是集光伏产品和现代种养技术于一体,并利用现代管理方法来进行太阳能转化的现代设施农业,是一个能实现经济社会发展、环境保护和光能高效利用的综合农业生产体系;光伏农业的前提是保护和改善农业生态环境,其目的是生产无公害绿色的有机农产品,而这一过程需遵循生态学和农业生产规律,并运用现代科学技术和系统工程方法创新能量转换方式;光伏农业也是观光休闲农业、都市生态农业的一部分,生态社会效益高,可持续发展能力强。简火仔^[53]认为,光伏农业是将光伏发电应用到农业种养、灌溉、病虫害防治和农业机械动力等领域的一种新型农业,其有利于环境保护、农业增效、农产品质量提升和农民增收,同时也能促进光伏产业的发展。2014 年,国内的光伏农业开始加速发展,各地相继建成了以光伏农业大棚等光伏设施农业为主的光伏农业项目,同时伴随着光伏农业产业园和光伏农业基地的出现。随着实践的深入,学者对光伏农业提出了新的定义。阮晓东^[54]认为,光伏农业是光伏发电与农业生产的结合,是一条“类工业”的绿色发展新路;由于光伏发电不仅解决了农业生产中的电力需求问题,产出的多余电力可并网输出,是一种重要的农业工程形式。刘文科^[55]指出,光伏农业是以光伏设施农业并网发电站为核心,将光伏发电和农业光电子工程应用到现代农业种养和农产品加工综合利用的高技术农业产业。类似地,房玉双等^[56]提出,光伏农业是由光伏产业和传统农业结合形成的高技术产业。从上述各种定义来看,相较于农光互补对“一地多用”和“农业发电两不误”想法的强调^[57-58],我国提出的光伏农业其内涵更为广泛,涵盖了光伏在农业中的应用和农光互补 2 个方面。

4 结论与展望

光伏在农业中的应用可以解决农业生产对绿色能源的需求问题,随着光伏技术的进步和光伏组件成本的下降,光伏在农业中的应用有着非常广阔的前景。农光互补更加体

现了光伏发电和农业生产的“共生”,从而共享土地和光照资源,提高资源利用率。而我国提出的光伏农业则包含了上述 2 个方面的内容。从研究内容来看,光伏在农业中应用的研究主要涉及如何将光伏技术应用于农业生产的各个环节,农光互补主要研究光伏发电与各农业子部门(农、林、牧、渔)的耦合以及相关效应,而光伏农业的相关研究则主要论及其概念和应用前景等问题。就光伏在农业中应用方面的研究而言,未来应以农业的发展趋势为基础,例如就光伏技术在智慧农业、精准农业中的应用展开研究。而农光互补则应关注光伏发电和农业生产“共生”的协同效应,并应在不同地区选择不同作物展开研究。上述 2 个方面都会促进光伏和农业更好地结合,并推动光伏产业与农业的共生融合。所以,产业共生将会成为后续光伏农业方面研究的新视角。从该视角出发,可对光伏产业和农业共生耦合的一系列问题进行研究,包括经济、社会和环境等方面。

参考文献

- [1] FERNANDES L, FERREIRA P. Renewable energy scenarios in the Portuguese electricity system [J]. *Energy*, 2014, 69: 51–57.
- [2] ANON. The solar energy society survey of research on applications of solar energy to agriculture, horticulture, animal husbandry, and forest products [J]. *Solar energy*, 1965, 9(2): 87–94.
- [3] 成思思. 光伏农业标准需模块化、精细化[N]. *中国能源报*, 2015-07-13 (021).
- [4] GORJIAN S, SINGH R, SHUKLA A, et al. On-farm applications of solar PV systems [M]//GORJIAN S, SHUKLA A. *Photovoltaic solar energy conversion: Technologies, applications and environmental impacts*. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [5] BRAINARD W A. The worldwide market for photovoltaics in the rural sector [C]//Proceeding of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, California, USA: IEEE, 1982: 1308–1313.
- [6] JARACH M. An overview of the literature on barriers to the diffusion of renewable energy sources in agriculture [J]. *Applied energy*, 1989, 32(2): 117–131.
- [7] KATZMAN M T, MATLIN R W. The economics of adopting solar energy systems for crop irrigation [J]. *American journal of agricultural economics*, 1978, 60(4): 648–654.
- [8] RADULOVIC V. Are new institutional economics enough? Promoting photovoltaics in India's agricultural sector [J]. *Energy policy*, 2005, 33(14): 1883–1899.
- [9] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, MOBLI H, et al. Technical and economical assessment of a multipurpose electric vehicle for farmers [J]. *Journal of cleaner production*, 2009, 17(17): 1556–1562.
- [10] 魏建明. 太阳能的开发与利用正在促进全球可持续农业和农村发展 [C]//中国农业机械学会. *农业机械化与新农村建设——中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集(上册)*. 北京: 中国农业机械学会, 2006: 78–83, 103.
- [11] 刘强, 黎妹红, 朱明峰, 等. 太阳能在智能生态农业中的应用 [J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2012, 13(3): 344–347.
- [12] 吴永忠, 刘伟. 风力提水光伏提水在西北农业生产和生态建设中的作用 [C]//严陆光, 崔容强. *21 世纪太阳能新技术——2003 年中国太阳能学会学术年会论文集*. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 866–868.
- [13] 盛锋, 滕国荣, 严建华, 等. 太阳能光伏水泵在农业方面的应用 [J]. *农机化研究*, 2008, 30(12): 198–200.
- [14] PETROSELLI A, BIONDI P, COLANTONI A, et al. Photovoltaic pumps: Technical and practical aspects for applications in agriculture [J]. *Mathematical problems in engineering*, 2012, 2012: 1–19.
- [15] MEHMOOD A, WAQAS A, MAHMOOD H T. Economic viability of solar photovoltaic water pump for sustainable agriculture growth in pakistan [J]. *Materials today: Proceedings*, 2015, 2(10): 5190–5195.
- [16] JONES M A, ODEH I, HADDAD M, et al. Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture [J]. *Desalination*, 2016, 387: 35–45.
- [17] CAMPANA P E, LEDUC S, KIM M, et al. Suitable and optimal locations for implementing photovoltaic water pumping systems for grassland irrigation in China [J]. *Applied energy*, 2017, 185: 1879–1889.
- [18] MÉRIDA GARCÍA A, FERNÁNDEZ GARCÍA I, CAMACHO POYATO E, et al. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 175: 670–682.
- [19] BASSI N. Solarizing groundwater irrigation in India: A growing debate [J]. *International journal of water resources development*, 2018, 34(1): 132–145.
- [20] VADIEE A, YAGHOUBI M. Enviro-economic assessment of energy conservation methods in commercial greenhouses in Iran [J]. *Outlook on agriculture*, 2016, 45(1): 47–53.
- [21] HASSANIEN R H E, LI M, LIN W D. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 54: 989–1001.
- [22] SAINI V, TIWARI S, TIWARI G N. Environ economic analysis of various types of photovoltaic technologies integrated with greenhouse solar drying system [J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 156: 30–40.
- [23] YANO A, ONOE M, NAKATA J. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications [J]. *Biosystems engineering*, 2014, 122: 62–73.
- [24] HASSANIEN R H E, LI M, YIN F. The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production [J]. *Renewable energy*, 2018, 121: 377–388.
- [25] MEKHILEF S, FARAMARZI S Z, SAIDUR R, et al. The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2013, 18(2): 583–594.
- [26] XUE J L. Assessment of agricultural electric vehicles based on photovoltaics in China [J]. *Journal of renewable sustainable energy* 2013, 5: 6745–6759.
- [27] 朱北仲. 太阳能光伏发电系统在农机方面的应用前景探析 [J]. *农业机械*, 2011(7): 20–21.
- [28] BEY M, HAMIDAT A, BENYOUCEF B, et al. Viability study of the use of grid connected photovoltaic system in agriculture: Case of Algerian dairy farms [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 63: 333–345.
- [29] 夏小会, 李正明. 光伏发电在农业照明中的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(26): 16402–16404.
- [30] MUMINOV A, JEON Y C, NA D, et al. Development of a solar powered bird repeller system with effective bird scarer sounds [C]//2017 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). Tashkent: IEEE, 2017.
- [31] GHOBADPOUR A, BOULON L, MOUSAZADEH H, et al. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems [J]. *Energy procedia*, 2019, 162: 4–13.
- [32] WANG T Y, WU G X, CHEN J W, et al. Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 70: 1178–1188.
- [33] LI C S, WANG H Y, MIAO H, et al. The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: Case study in China [J]. *Applied energy*, 2017, 190: 204–212.
- [34] ALLARDYCE C S, FANKHAUSER C, ZAKEERUDDIN S M, et al. The influence of greenhouse-integrated photovoltaics on crop production [J]. *Solar energy*, 2017, 155: 517–522.
- [35] MORETTI S, MARUCCI A A. A photovoltaic greenhouse with variable shading for the optimization of agricultural and energy production [J]. *Energies*, 2019, 12(13): 1–15.
- [36] GOETZBERGER A, ZASTROW A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation [J]. *International journal of solar energy*, 1982, 1(1): 55–69.
- [37] WESELEK A, EHMANN A, ZIKELI S, et al. Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review [J]. *Agronomy for sustainable development*, 2019, 39(4): 1–20.
- [38] DUPRAZ C, MARROU H, TALBOT G, et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes [J]. *Renewable energy*, 2011, 36(10): 2725–2732.
- [39] MARROU H, DUFOUR L, WERY J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? [J]. *European journal of agronomy*, 2013, 50: 38–51.
- [40] MARROU H, GUILIONI L, DUFOUR L, et al. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2013, 177: 117–132.

- food chemistry, 2007, 55(4):1077-1083.
- [73] BRYANT R J, MCCLUNG A M. Volatile profiles of aromatic and non-aromatic rice cultivars using SPME/GC-MS[J]. Food chemistry, 2011, 124(2):501-513.
- [74] 胡志全, 王海洋, 刘友明. 电子鼻识别大米挥发性物质的应用性研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7):93-98.
- [75] 黄亚伟, 徐晋, 王若兰, 等. HS-SPME/GC-MS 对五常大米中挥发性成分分析[J]. 食品工业, 2016, 37(4):266-269.
- [76] 钱丽丽, 乔治, 左锋, 等. 基于电子鼻技术的地理标志大米产地溯源研究[J]. 农产品加工, 2014(24):38-41.
- [77] 钱丽丽, 章采东, 李殿威, 等. 基于挥发成分的大米蒸煮前后产地溯源研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(2):40-45.
- [78] DITTMEN C L, HOFFMANN J F, CHAVES F C, et al. Discrimination of genotype and geographical origin of black rice grown in Brazil by LC-MS analysis of phenolics[J]. Food chemistry, 2019, 288:297-305.
- [79] 李政, 赵燕, 郗梦洁, 等. 植源性农产品产地溯源技术研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2020(1):61-67, 84.
- [80] CHEAJESADAGUL P, ARNAUDGUILHEM C, SHIOWATANA J, et al. Discrimination of geographical origin of rice based on multi-element fingerprinting by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Food chemistry, 2013, 141(4):3504-3509.
- [81] CHUNG I M, KIM J K, LEE J K, et al. Discrimination of geographical origin of rice (*Oryza sativa* L.) by multielement analysis using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy and multivariate analysis[J]. Journal of cereal science, 2015, 65:252-259.
- [82] 石春红, 曹美萍, 胡桂霞. 基于矿物元素指纹图谱技术的松江大米产地溯源[J]. 食品科学, 2020, 41(16):300-306.
- [83] 王朝辉, 张亚婷, 闵伟红, 等. 水稻品种对大米产地溯源判别正确性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(1):113-119.
- [84] 钱丽丽, 于果, 迟晓星, 等. 农产品产地溯源技术研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(1):246-249.
- [85] 黎永乐, 郑彦婕, 汤璐, 等. 基于无机元素分析对地理标志五常大米鉴别技术的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3):834-837.
- [86] 宋雪健, 冷侯喜, 张爱武, 等. 黑龙江省不同产地大米中矿物元素含量分析与比较[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2016, 28(3):66-70, 128.
- [87] 张玥, 王朝辉, 张亚婷, 等. 基于主成分分析和判别分析的大米产地溯源[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(4):1-5.
- [88] DU M J, FANG Y, SHEN F, et al. Multiangle discrimination of geographical origin of rice based on analysis of mineral elements and characteristic volatile components[J]. International journal of food science and technology, 2018, 53(9):2088-2096.
- [89] LANGE C N, MONTEIRO L R, FREIRE B M, et al. Mineral profile exploratory analysis for rice grains traceability[J]. Food chemistry, 2019, 300:1-10.
- [90] QIAN L L, ZHANG C D, ZUO F, et al. Effects of fertilizers and pesticides on the mineral elements used for the geographical origin traceability of rice[J]. Journal of food composition and analysis, 2019, 83:1-7.
- [91] QIAN L L, ZUO F, ZHANG C D, et al. Geographical origin traceability of rice: A study on the effect of processing precision on index elements[J]. Food science and technology research, 2019, 25(5):619-624.
- [92] SEGURA F R, FRANCO D F, DA SILVA J J C, et al. Variations in total As and As species in rice indicate the need for crop-tracking[J]. Journal of food composition and analysis, 2020, 86:1-6.
- [93] 马慧莹, 余冰雪, 李妍, 等. 食品溯源技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5):277-284.
- [94] 吴子温, 路运才. SSR 标记在玉米研究中的应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(Z1):13-15, 48.
- [95] 毛慧慧, 罗光华. 常见单核苷酸多态性分析方法的原理和应用简析[J]. 临床检验杂志, 2016, 34(11):858-860.
- [96] 陈钢. PCR 技术在食品检测中的应用分析[J]. 食品安全导刊, 2020(33):144.
- [97] SUN M M, SONG B H, WOO S H, et al. Genetic diversity and discrimination of recently distributed Korean cultivars by SSR markers[J]. Korean journal of breeding science, 2009, 41(2):115-125.
- [98] KIM M S, SONG J Y, KANG K K, et al. Discrimination of Korean rice varieties as revealed by DNA profiling and its relationship with genetic diversity[J]. Journal of plant biotechnology, 2017, 44(3):243-263.
- [99] MINH H K Q, RAKSHIT S K. Use of specific PCR-based molecular markers for discrimination, rapid analysis of purity and identification of six fragrant rice varieties[J]. International journal of food science and technology, 2009, 44(10):1959-1965.
- [100] KAJIWARA H, YAMAGUCHI M, SATO H, et al. Discrimination among rice varieties based on rapid detection of single nucleotide polymorphisms by a newly developed method, mass spectrometric cleaved amplified polymorphic sequence (MS-CAPS) analysis[J]. Plant omics, 2012, 5(3):231-237.
- [101] 庞博文, 王勤志, 王俊涛, 等. 基于 DNA 检测的肉制品鉴伪技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8):333-340, 346.
- [102] 陈羽红, 张东杰, 张桂芳, 等. 代谢组学技术在食品产地溯源中的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2016(7):16-19, 28.
- [103] CHAE Y K, KIM S H. Discrimination of rice products by geographical origins and cultivars by two-dimensional NMR spectroscopy[J]. Bulletin of the Korean chemical society, 2016, 37(10):1612-1617.
- [104] HUO Y Q, KAMAL G M, WANG J, et al. ¹H NMR-based metabolomics for discrimination of rice from different geographical origins of China[J]. Journal of cereal science, 2017, 76:243-252.
- [105] LIM D K, LONG N P, MO C, et al. Optimized mass spectrometry-based metabolite extraction and analysis for the geographical discrimination of white rice (*Oryza sativa* L.): A method comparison study[J]. Journal of AOAC international, 2018, 101(2):498-506.
- [106] XIAO R, MA Y, ZHANG D J, et al. Discrimination of conventional and organic rice using untargeted LC-MS-based metabolomics[J]. Journal of cereal science, 2018, 82:73-81.
- [107] 王娟强, 李莹莹, 李石磊, 等. 基于质谱的代谢组学技术在肉类科学中的应用[J]. 食品科学, 2020, 41(23):293-302.
- [108] CUBERO-LEON E, PEÑALVER R, MAQUET A. Review on metabolomics for food authentication[J]. Food research international, 2014, 60:95-107.

(上接第 21 页)

- [41] MARROU H, WERY J, DUFOUR L, et al. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels[J]. European journal of agronomy, 2013, 44:54-66.
- [42] HARINARAYANA T, VASAVI K S V. Solar energy generation using agriculture cultivated lands[J]. Smart grid & renewable energy, 2014, 5(2):31-42.
- [43] CHRISTINE R. Agrovoltaic Systems-The energy transition in agriculture[J]. GAIA-Ecological perspectives for science and society, 2016, 25(4):242-246.
- [44] MAJUMDAR D, PASQUALETTI M J. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrovoltaics' in phoenix metropolitan statistical area, USA[J]. Landscape and urban planning, 2018, 170:150-168.
- [45] PRINGLE A M, HANDLER R M, PEARCE J M. Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2017, 80:572-584.
- [46] DINESH H, PEARCE J M. The potential of agrivoltaic systems[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 54:299-308.
- [47] WETTSTEIN S, MUIR K, SCHARFY D, et al. The environmental mitigation potential of photovoltaic-powered irrigation in the production of South African Maize[J]. Sustainability, 2017, 9(10):1-20.
- [48] AMADUCCI S, YIN X Y, COLAUZZI M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production[J]. Applied energy, 2018, 220:545-561.
- [49] MALU P R, SHARMA U S, PEARCE J M. Agrivoltaic potential on grape farms in India[J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2017, 23:104-110.
- [50] LEON A, ISHIHARA K N. Assessment of new functional units for agrivoltaic systems[J]. Journal of environmental management, 2018, 226:493-498.
- [51] RAVI S, MACKNICK J, LOBELL D, et al. Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands[J]. Applied energy, 2016, 165:383-392.
- [52] 彭梅牙. 新余市大力发展光伏农业[J]. 南方农机, 2012, 43(2):4-6.
- [53] 简火仔. 光伏农业带来光明未来[J]. 江西农业, 2013(5):18.
- [54] 阮晓东. 光伏农业:绿色新路[J]. 新经济导刊, 2014(3):30-33.
- [55] 刘文科. 快速发展的光伏农业[J]. 中国农村科技, 2014(8):54-55.
- [56] 房玉双, 铁生年. 光伏农业发展中存在的问题及对策建议[J]. 甘肃农业科技, 2015(5):61-63.
- [57] 蒋高中, 徐跑, 刘辉芬, 等. 光伏产业的发展现状及其在农业中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(20):60-62.
- [58] 柴帆. 现代产业链下的农业光伏新模式[J]. 中国农村科技, 2016(9):64-67.