

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.20250048

# 外来入侵植物种子活力评估技术研究进展

张越<sup>1</sup>, 曹晶晶<sup>1</sup>, 郭建英<sup>1</sup>, 万方浩<sup>1</sup>, 刘万学<sup>1</sup>, 黄宏坤<sup>2</sup>, 王瑞<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193;

<sup>2</sup>农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125

**摘要:** 外来入侵植物对生态环境和农业生产构成重大威胁, 其种子活力是决定入侵成功的关键因素。传统种子活力测定方法(如四唑染色法、标准发芽试验)存在耗时长、破坏种子完整性等局限, 难以满足入侵植物快速筛查与扩散评估需求。近年来, 无损检测技术结合人工智能, 实现了种子活力的高效、非破坏性评估, 为入侵植物的早期预警和精准管控提供了新方法。本文系统综述了传统与无损两类种子活力检测技术的原理、应用及研究进展, 分析两者的优缺点, 探讨设备便携化、多技术融合等应用发展方向, 深入探究种子活力, 特别是低活力与无活力状态的分子调控机理等未来方向, 以期为入侵植物种子活力的动态监测、不同活力状态(高活力、低活力、无活力)种子的风险评估及基于活力阻断(特别是诱导无活力种子形成)的源头防控策略提供理论依据与技术支撑, 提升生物安全风险防范效能。

**关键词:** 入侵植物; 种子活力; 四唑染色法; 无损光谱技术; 活力状态

## Research advances in seed vigor assessment technology for invasive alien plants

ZHANG Yue<sup>1</sup>, CAO Jingjing<sup>1</sup>, GUO Jianying<sup>1</sup>, WAN Fanghao<sup>1</sup>, LIU Wanxue<sup>1</sup>, HUANG Hongkun<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory for Biology of Plant Disease and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; <sup>2</sup>Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China

**Abstract:** Invasive alien plants (IAPs) pose serious threats to ecological integrity and agricultural production. Seed vigor is a key determinant of invasion success. Conventional seed vigor assays (e.g., tetrazolium test and standard germination test) are often destructive and time-consuming, demonstrating limited effects for rapid screening and risk assessment of IAPs. In recent years, the integration of non-destructive detection technologies (NDTs) with artificial intelligence enables efficient, non-invasive seed vigor evaluation. This offers novel approaches for early warning and precision control. This review systematically examines the principles, applications, and progress of both conventional and NDT-based seed vigor assessment methods, critically comparing their strengths and limitations. Future directions are discussed, including multimodal technology fusion, device miniaturization, and molecular mechanisms governing seed vigor, particularly the formation of low- and non-viable seeds. This review provides a theoretical and technical foundation for dynamically monitoring the seed vigor of IAPs, assessing the risk of IAPs based on distinct seed vigor states (high-, low-, and non-viable), and developing source-control strategies based on vigor disruption (especially inducing non-viable seed formation). These advancements are crucial for enhancing the prevention and management of biosafety risks.

**Key words:** invasive alien plants; seed vigor; tetrazolium test; non-destructive spectroscopy; vigor states

由于全球化与国际贸易的加剧, 生物入侵已成为一项严峻的全球性生态挑战(Early *et al.*, 2016)。我国作为全球贸易体系的核心参与者, 正面临严峻的生物入侵形势。据统计, 截至 2020 年, 我国已发

现 660 多种外来入侵物种, 其中入侵植物达 402 种(Hao & Ma, 2022)。这些入侵植物普遍具有种类多、分布广、扩散快、危害重等特点。它们通过资源竞争、化感作用等机制破坏本地生态系统, 导致生

收稿日期(Received): 2025-04-06 接受日期(Accepted): 2025-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2602200); 国家自然科学基金(32272569)

作者简介: 张越, 女, 硕士研究生。研究方向: 入侵生物学。E-mail: zhangyue02052024@163.com

\* 通信作者(Author for correspondence), 王瑞, E-mail: wangrcaas@163.com

生物多样性下降及特有种质资源流失,对区域生态安全和生物安全构成持续威胁(刘艳杰等,2022; Hierro & Callaway, 2021)。在此背景下,建立入侵植物动态监测体系与风险评估机制是科学防控的重要前提。

种子传播是外来植物入侵的关键途径之一,种子的存活能力直接决定了传入植物定殖的成功率。在种子生物学特性中,种子活力是衡量其繁殖潜力的核心指标。它是种子萌发阶段生理机能的综合表征,对幼苗快速整齐建成具有调控作用(Copeland & McDonald, 2001)。在入侵植物中,种子活力通过影响萌发节律、休眠解除难易程度及幼苗建成效率等关键过程,调控入侵种群的形成与扩散速率。

种子活力受遗传、环境等多种因素影响(Sun *et al.*, 2007),根据活力高低和休眠特性,可大致分为高活力种子(休眠型和非休眠型)、低活力种子(休眠型和非休眠型)以及无活力种子。高活力种子在异质生境中具有萌发优势,能快速建立即时种群抢占生态位空窗期,或通过土壤种子库中保持长时间活性产生时间储存效应,使入侵种群在时空维度上获得竞争优势,增强生态适应性并削弱防控措施效果(Shen *et al.*, 2011)。低活力种子(尤其是休眠型)通过延迟萌发起规避短期不利环境,提高种群在多变环境中的持久性和恢复潜力。无活力种子虽丧失萌发能力,但其形成机制研究对入侵防控具有特殊意义。因此,探究入侵植物种子活力的区域差异,特别是低活力与无活力种子的形成机制(如杂交衰退、近交衰退、遗传漂变、长期环境胁迫导致的生理性衰变)及其影响因素(如极端温度、水分胁迫、病原微生物侵染、土壤理化性质恶化等),对调控入侵动态及制定针对性防控措施至关重要(Ventura *et al.*, 2012)。

鉴于高活力、低活力(尤其是休眠型)及无活力种子在入侵过程中的作用机制不同,精确区分和评估入侵植物种群的活力构成至关重要。这种评估不仅能揭示特定入侵种群高活力种子的即时威胁程度,更能预警低活力种子的长期持久潜力以及评估无活力种子的失效风险。准确掌握不同活力类型种子的分布及其内部理化性质的差异,可为制定高效、精准入侵预警与防控策略提供理论参考。

## 1 种子活力评估在入侵植物防控中的应用

鉴于种子活力对入侵过程的显著调控作用,其

精准评估已成为入侵风险早期预警与防控的关键科学依据。目前,该技术已系统应用于3个方面。

在入侵风险评估方面,苋科、菊科和禾本科等入侵植物凭借种子形态适应性及休眠-萌发动态形成持久土壤种子库以增强入侵潜力(邓雄等,2003; Gioria *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2024);通过构建种子库活力衰减与子代遗传稳定性量化模型,精准预测定殖扩张趋势。

在防控策略优化方面,利用化感物质抑制种子活力是阻断种群更新的核心路径。例如:肿柄菊 *Tithonia diversifolia* A. Gray 倍半萜类物质可破坏三叶鬼针草 *Bidens pilosa* L. 种子膜完整性(田学军等,2015),匍根骆驼蓬 *Peganum harmala* Bunge 浸提液对刺萼龙葵 *Solanum rostratum* Dunal. 萌发存在剂量依赖性抑制( $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  完全抑制)(李冬至等,2025),这些发现为开发靶向活力抑制剂提供了理论支撑。

在生态修复指导方面,针对豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L.、紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* Spreng. 等入侵生态系统,筛选兼具高种子活力与资源竞争优势的本地植物进行替代种植,可构建持续抑制入侵再生的恢复群落(高尚宾等,2017)。

## 2 种子活力评估技术分类及其应用

针对入侵植物种子活力评估应用的重要性和入侵植物种子样本的稀缺性与完整性要求,以及活力状态评估研究的迫切需求,种子活力检测技术需兼顾效率、精度与样本非破坏性。现有技术主要分为传统检测技术和无损快速检测技术两大类(Marcos, 2015)。

### 2.1 传统种子活力检测技术

传统种子活力测定方法基于种子的生理生化特性或形态胁迫响应进行,在外来入侵植物研究中应用广泛。这些方法包括:依赖活细胞脱氢酶活性的四唑染色法(França-neto & Krzyzanowski, 2022);通过测量电解质外渗评估细胞膜完整性的电导率测定法(曲宗普尺等,2023);依据种子活力与呼吸强度正相关的呼吸测定法;在最优条件下综合观测萌发及幼苗生长的标准发芽试验法(李月明等,2013);模拟高温高湿胁迫以区分耐受力的加速老化试验法(Demirkaya, 2013; Qin *et al.*, 2011)。

四唑染色法通过染色深度反映活力高低,被用于解析小蓬草 *Erigeron canadensis* (L.) Cronq. (郝建

华等,2009)、刺苍耳 *Xanthium spinosum* L. (李杰和马森,2011)、早熟禾 *Poa annua* L. (Williams *et al.*, 2016)等入侵植物种子活力与萌发特性的关系,并作为种群动态模型的关键参数(Schwartz *et al.*, 2016)。电导率测定法曾用于解析加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L.种子成熟过程中的活力发育规律(安欣欣等,2008)。标准发芽试验法作为核心方法,广泛用于研究黄顶菊 *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze.种子经动物消化道后的萌发适应性(腾忠才等,2011)、构建飞机草 *Chromolaena odorata* L.萌发的温度响应模型(孙彰镁等,2023)、评估化感作用及生态因子对豚草(王瑞丽,2020)、石茅 *Sorghum halepense* (L.) Pers. (王亚等,2023)等入侵植物种子萌发的调控。加速老化试验法常用于评估耐贮性和贮藏潜力,多应用于研究食用日中花 *Carpobrotus edulis* (L.) N.E. Br (Fenollosa *et al.*, 2020)、反枝苋 *Amaranthus retroflexus* L. (陈香来,2020)、节节麦 *Aegilops tauschii* Coss. (Wang *et al.*, 2021)等物种的扩散潜力。

传统方法虽各已广泛应用,但也存在明显局限,主要表现为普遍具有破坏性(尤其是四唑染色法)或耗时较长(如发芽和老化试验),难以满足入侵植物稀有样本快速、无损、高通量筛查及后续复用(如分子分析)的需求,且对低活力/无活力种子的精细化、非破坏性评估能力不足。此外,电导率法还受种子均质性和含水量干扰(石睿等,2024)。

## 2.2 种子活力无损检测技术原理与应用前景

无损检测技术利用物理信号(光、电、气味)在不损害种子活力的前提下,快速获取其内部生理生化状态信息,适合入侵植物稀缺种子的活力评估及后续研究。

高光谱成像(hyperspectral image, HSI)通过同步获取种子空间图像和连续窄波段光谱信息,融合分析实现多维生理状态评估,在非破坏性识别种子表型异常、量化内部化学成分变化、结合机器学习建立活力分级模型方面潜力巨大,适用于实验室精细分析(Bhargava *et al.*, 2024; Wang & Song, 2024)。多光谱成像(multispectral image, MSI)虽信息量少于HSI,但通过获取少量离散宽波段的光谱和图像信息,操作更简便、成本较低,适合高通量筛查,能通过关键波段反射差异及形态特征快速预测种子发芽率衰减趋势,在口岸检疫、田间快速监测方面具有潜力(Xu *et al.*, 2025)。技术成熟的近红外光谱(near-in-

frared reflectance spectroscopy, NIRS)利用含氢基团在近红外区的特征吸收,快速反映种子内部有机物(如蛋白质、脂肪、淀粉、水分)的含量和生理状态,适合构建种子活力(如发芽率)的快速预测模型,在海关口岸快速筛查、大批量评估及仓储监测中应用前景广阔(冯放,2007; Tsuchikawa *et al.*, 2022)。拉曼光谱(Raman spectroscopy, RS)基于光子与分子振动模式的非弹性散射提供小分子(如氨基酸、脂肪酸、核酸、激素)的特征“指纹”信息,可无标记、无损地检测种子代谢活性、化学成分差异及老化程度,用于精确解析活力丧失的分子机制及区分地理种群或杂交衰退导致的生理差异(Hoffmann, 2023)。电子鼻技术利用传感器阵列检测种子代谢释放的特征性挥发性有机物图谱,结合模式识别算法关联活力状态,适用于快速筛查种子霉变、劣变(徐凯杰,2022)。激光散斑技术通过分析激光照射种子表面产生的动态散斑图案的时空变化,实时、无损地反映种子内部代谢活动的强弱,适用于研究入侵植物种子对环境胁迫的即时生理响应(Braga *et al.*, 2003)。

无损技术以其非破坏性、高通量、可提供多维信息的核心优势,为入侵植物种子活力研究带来创新性途径。采用该技术评估后的种子可继续用于分子溯源、显微观察或种植验证,极大提升稀有样本价值,并能精准识别区分高、低、无活力种子,突破传统方法瓶颈。结合化学计量学和机器学习,可无损解析活力差异的生理生化基础。在应用层面,无损技术为快速筛查口岸截获种子、实时监测野外种子库活力动态、定位入侵再生热点提供了强有力工具,也能无损量化各类防控措施(如除草剂、化感物质、生物防治、环境胁迫)对种子活力的抑制效果。通过无损监测特定胁迫诱导无活力种子形成的规律和阈值,有望为开发基于“活力阻断”的源头防控新策略提供科学依据。开发便携式设备、多技术融合模型及人工智能(artificial intelligence, AI)驱动的实时分析预警平台是未来的重点研究方向。

## 3 种子活力评估技术研究展望

当前种子活力评估研究存在明显局限,评估技术主要聚焦高活力种子,对低活力及无活力种子的生态功能与形成机制研究严重不足。主要表现:低活力种子通过风险分摊策略调控定殖的机制不明、基于无活力种子形成机制的防控策略开发潜力尚未充分挖掘以及缺乏标准化技术评估低活力和无

活力种子的生理衰变与遗传衰退特征。未来需发展无损、多技术融合的综合评估体系,解析入侵植物种子的全活力谱特性,揭示其调控入侵种群的形成机制,推动基于活力阻断的主动防控。核心研究方向包括无损检测技术体系构建、低/无活力种子精准识别与机制解析以及高通量预警与主动防控。

在无损检测技术体系构建方面,应通过 NIRS、RS 等光谱技术实现样本零损伤评估,其核心价值在于保障种子完整性以支撑多维研究。评估后种子可直接用于分子溯源(如低活力种子的遗传分析)、微观结构观察(活力丧失机制解析)或种植验证(高活力种子的入侵风险确认),避免传统破坏性检测导致的信息链断裂。更重要的是,无损获取的丰富光谱、化学和代谢信息,为深入解析种子活力差异及低/无活力种子形成的分子调控机理提供了关键数据基础。技术创新路径需重点突破:开发集成环境光校准算法的手持式光谱仪以提升野外适用性;建立多模态数据融合模型(如 NIRS+RS+代谢组)以增强复杂样本分类精度;结合深度学习与物联网技术,构建“单点检测→云端预警”实时平台。

在低/无活力种子精准识别与机制解析方面,应基于化学成分与代谢特征的无损检测,实现全活力谱系精准识别与功能解析。针对低活力种子,需通过光谱特征识别活力衰退个体,重点探究其风险分摊策略(如延迟萌发)的定殖调控机制,并评估防控措施对其的特异性抑制效应。针对无活力种子,需深入解析胁迫诱导形成机制,为开发定向提高无活力种子比例的防控措施提供依据。此外,应结合地理种群信息,揭示不同来源入侵种群的种子生理特性与入侵力的跨尺度相关性。

在高通量预警与主动防控方面,应依托 AI 驱动的高通量筛查技术,推动生物安全防控从被动响应转向主动干预。这包括构建实时决策系统,例如:在口岸检疫场景实现短时间内完成单样本评估以快速筛查疑似入侵种子,在大范围监测中构建种子库活力动态图谱以定位入侵再生热点区域。主动防控的延伸方向包括:基于对活力衰减规律的深入解析,在种子发育关键期施加特定胁迫因子,定向诱导无活力种子形成,从源头阻断种群更新。

## 参考文献

安欣欣,林燕,吴丽丽,叶子弘,2008.加拿大一枝黄花的

- 开花及种子成熟规律研究. *杂草科学* (4): 18-22.
- 陈香来,2020.降水变化对黄土高原常见植物种子寿命的影响研究. 硕士学位论文. 兰州:兰州大学.
- 邓雄,杨期和,叶万辉,冯惠玲,曹洪麟,2003.生物入侵的适应性进化及其影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 42(A19): 204-210.
- 高尚宾,张宏斌,孙玉芳,张国良,2017.植物替代控制3种入侵杂草技术的研究与应用进展. *生物安全学报*, 26(1): 18-22, 102.
- 冯放,2007.现代近红外光谱分析技术及其应用. *生命科学仪器*, 5(10): 9-13.
- 郝建华,吴海荣,强胜,2009.部分菊科入侵种子(瘦果)的萌发能力和幼苗建群特性. *生态环境学报*, 18(5): 1851-1856.
- 李冬至,赵杏花,刘瑞敏,张靖媛,邵亚洲,黄颖,2025.葡根根茎浸提液对刺萼龙葵种子萌发的影响. *干旱地区农业研究*, 43(4): 1-8.
- 李杰,马森,2017.新疆外来入侵植物意大利苍耳和刺苍耳种子的越冬性能. *生态学报*, 37(21): 7181-7186.
- 李月明,郝楠,孙丽惠,张庆芳,叶雨盛,2013.种子活力测定方法研究进展. *辽宁农业科学* (1): 38-40.
- 刘艳杰,黄伟,杨强,郑玉龙,黎绍鹏,吴昊,鞠瑞亭,孙燕,丁建清,2022.近十年植物入侵生态学重要研究进展. *生物多样性*, 30(10): 276-292.
- 曲宗普尺,毛光锋,吴敏,吴洪恺,2023.水稻种子浸泡液电导率与种子活力的关系. *中国农业科技导报*, 25(1): 35-41.
- 石睿,罗斌,张晗,侯佩臣,周亚男,王成,2024.种子活力性状无损速测技术研究进展. *江苏农业科学*, 52(7): 1-10.
- 孙彰镁,旷远文,王俊,简曙光,张玲玲,2023.入侵植物飞机草和南美蜚螞菊种子萌发特征对热带珊瑚岛生境的响应. *热带亚热带植物学报*, 31(6): 757-765.
- 滕忠才,李瑞军,陆秀君,刘廷辉,王付民,胡国律,沈佐锐,2011.动物过腹对黄顶菊种子活力的影响. *植物检疫*, 25(2): 14-17.
- 田学军,沈云玫,陶宏征,沈登荣,何超,2015.入侵植物肿柄菊对三叶鬼针草的化感作用. *生态环境学报*, 24(7): 1128-1131.
- 王瑞丽,2020.豚草和三裂叶豚草地下种子库命运和种子萌发的自毒效应对种群的调节作用. 硕士学位论文. 石河子:石河子大学.
- 王亚,刘延,范志伟,黄乔乔,2023.入侵植物石茅种子萌发及幼苗生长对干旱胁迫的响应特征. *草业科学*, 40(8): 2020-2027.
- 徐凯杰,2022.电子鼻技术及其在种子品质检测中的应用概况. *农业装备技术*, 48(2): 4-6.

- BHARGAVA A, SACHDEVA A, SHARMA K, ALSHARIF M H, UTHANSAKUL, P, UTHANSAKUL M, 2024. Hyperspectral imaging and its applications: a review. *Heliyon*, 10(12): e33208.
- BRAGA R A, DAL FABBRO I M, BOREM F M, RABELO G, ARIZAGA R, RABAL H J, TRIVI M, 2003. Assessment of seed viability by laser speckle techniques. *Biosystems Engineering*, 86(3), 287–294.
- COPELAND L O, MCDONALD M B, 2001. Seed vigor and vigor testing//*Principles of seed science and technology*. Boston, MA: Springer: 165–191.
- DEMIRKAYA M, 2013. Relationships between antioxidant enzymes and physiological variations occur during ageing of pepper seeds. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 54(2): 97–102.
- EARLY R, BRADLEY B A, DUKES J S, LAWLER J J, OLDEN J D, BLUMENTHAL D M, GONZALEZ P, GROSHOLZ E D, IBAÑEZ I, MILLER L P, SORTE C J B, TATEM A J, 2016. Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nature Communications*, 7(1): 12485.
- FENOLLOSA E, JENÉL, MUNNÉ-BOSCH S, 2020. A rapid and sensitive method to assess seed longevity through accelerated aging in an invasive plant species. *Plant Methods*, 16: 1–11.
- FRANÇA-NETO J D B, KRZYŻANOWSKI F C, 2022. Use of the tetrazolium test for estimating the physiological quality of seeds. *Seed Science and Technology*, 50(2): 31–44.
- GIORIA M, CARTA A, BASKIN C C, DAWSON W, ESSL F, KREFT H, PERGL J, VAN KLEUNEN M, WEIGELT P, WINTER M, 2021. Persistent soil seed banks promote naturalisation and invasiveness in flowering plants. *Ecology Letters*, 24(8): 1655–1667.
- HAO Q, MA J S, 2022. Invasive alien plants in China: an update. *Plant Diversity*, 45(1): 117.
- HIERRO J L, CALLAWAY R M, 2021. The ecological importance of allelopathy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52(1): 25–45.
- HOFFMANN G G, 2023. Infrared and raman spectroscopy: principles and applications. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- MARCOS F J, 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola*, 72(4): 363–374.
- QIN P, KONG Z, LIAO X, LIU Y, 2011. Effects of accelerated aging on physiological and biochemical characteristics of waxy and non-waxy wheat seeds. *Journal of Northeast Agricultural University (English edition)*, 18(2): 7–12.
- SCHWARTZ L M, GIBSON D J, YOUNG B G, 2016. Using integral projection models to compare population dynamics of four closely related species. *Population Ecology*, 58(2): 285–292.
- SHEN Y X, ZHAO C Y, LIU W Y, 2011. Seed vigor and plant competitiveness resulting from seeds of *Eupatorium adenophorum* in a persistent soil seed bank. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206(11): 935–942.
- SUN Q, WANG J H, SUN B Q, 2007. Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms. *Agricultural Sciences in China*, 6(9): 1060–1066.
- TSUCHIKAWA S, MA T, INAGAKI T, 2022. Application of near-infrared spectroscopy to agriculture and forestry. *Analytical Sciences*, 38(4): 635–642.
- VENTURA L, DONÀM, MACOVEI A, CARBONERA D, BUTTAFAVA A, MONDONI A, ROSSI G, BALESTRAZZI A, 2012. Understanding the molecular pathways associated with seed vigor. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60: 196–206.
- WANG N, YUAN M, CHEN H, 2021. Effects of artificial aging on seed vigor and physiological characteristics of the invasive alien plant *Aegilops tauschii*. *Acta Societatis Botanico-rum Poloniae*, 90: 9010.
- WANG X J, GE W J, ZHANG M T, FERNÁNDEZ-PASCUAL E, MOLES A, SAATKAMP A, ROSBAKH S, BU H Y, PANAH I P, MA M J, 2024. Large and non-spherical seeds are less likely to form a persistent soil seed bank. *Proceedings of the Royal Society B*, 291: 20232764.
- WANG Y, SONG S, 2024. Detection of sweet corn seed viability based on hyperspectral imaging combined with firefly algorithm optimized deep learning. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1361309.
- WILLIAMS L K, KRISTIANSEN P, SINDEL B M, WILSON S C, SHAW J D, 2016. Quantifying the seed bank of an invasive grass in the sub-antarctic: seed density, depth, persistence and viability. *Biological Invasions*, 18: 2093–2106.
- XU J, SONG Y, RUI Z, ZHANG Z, HU C, WANG L, LI W, XING J, WANG X, 2025. Trend analysis of the application of multispectral technology in plant yield prediction: a bibliometric visualization analysis (2003—2024). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9: 1513690.