

超积累植物的资源化利用及综合价值评价综述

蒋 朔

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年7月28日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月2日

摘 要

超积累植物能够富集重金属, 浓度比普通植物高100倍以上, 在污染土壤的植物修复中发挥着关键作用。本综述系统地探讨了超积累植物在修复后资源利用的途径及其综合价值评估。传统的热处理方法(如焚烧、热解、水热炭化)以及微生物堆肥能有效将富集金属的生物体转化为能源、吸附剂或土壤改良剂, 但面临着二次污染和高能耗等挑战。新兴的植物采矿和金属纳米粒子的绿色合成技术提供了经济上可行的替代方案, 既能回收战略性金属(如金、镍、镉), 又能生成高价值的纳米材料, 同时很大限度地降低环境风险。经济分析表明, 先进的方法成本更低, 且金属回收率更高。未来的研究应聚焦于优化混合技术并建立可拓展的定量模型。这项工作为构建“修复-回收-再利用”链以解决土壤污染和资源短缺问题提供了关键见解。

关键词

超积累植物, 重金属, 资源化利用

A Review of Resource Utilization and Comprehensive Value Assessment of Hyperaccumulating Plants

Shuo Jiang

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Jul. 28th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

Abstract

Hyperaccumulating plants possess the remarkable ability to concentrate heavy metals at levels exceeding those of ordinary plants by over 100 times, making them pivotal in the phytoremediation of contaminated soils. This review systematically examines the pathways for resource utilization of

hyperaccumulating plants post-remediation, alongside a comprehensive evaluation of their value. Traditional approaches, such as conventional thermal treatments (e.g., incineration, pyrolysis, and hydrothermal carbonization) and microbial composting, effectively transform metal-enriched biomass into valuable products like energy, adsorbents, or soil amendments. However, these methods are hindered by challenges including secondary pollution and high energy consumption. In contrast, emerging technologies such as phytomining and the green synthesis of metal nanoparticles present economically viable alternatives. These innovative methods enable the recovery of strategic metals (e.g., gold, nickel, cadmium) and the production of high-value nanomaterials, while significantly reducing environmental risks. Economic analysis reveals that these advanced techniques offer lower costs and higher metal recovery rates compared to conventional methods. Looking ahead, future research should prioritize the optimization of hybrid technologies and the development of scalable quantitative models. This work provides critical insights into establishing a “remediation-recovery-reuse” chain, offering a sustainable solution to address soil contamination and resource scarcity.

Keywords

Hyperaccumulating Plants, Heavy Metals, Resource Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤重金属污染已成为全球性环境挑战。全国土壤污染调查显示,我国耕地土壤重金属点位超标率为19.4%,威胁粮食安全及生态系统健康。传统物理化学修复技术(如客土法、化学淋洗)成本高昂且破坏土壤结构,而植物修复技术因其环境友好性和经济可持续性备受关注。其中,超积累植物作为核心载体,可通过根系特异吸收、转运及液泡区隔化等机制,在受污染土壤中富集砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)等重金属,其地上部富集浓度可达普通植物百倍以上(如Zn/Mn临界值达 $10,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),同时保持生物量稳定。

当前研究焦点已从单一修复转向“修复-资源化”协同。超积累植物生物质后续处理若不当,可能导致重金属二次释放。焚烧、热解等热处理技术虽能减容90%以上并回收能源,但存在二噁英排放及飞灰污染风险;堆肥可提升土壤肥力,却受限于重金属渗漏及甲烷排放。因此,开发高效、低风险的资源化技术势在必行。近年来,植物采矿通过焚烧富集金属的植株直接获取“生物矿”,以及利用植物提取液绿色合成金属纳米颗粒,为战略金属资源回收(如我国锑资源对外依存度 $>90\%$)提供了新路径。

本综述旨在系统解析超积累植物资源化利用的技术路径与环境经济价值:(1)阐明其重金属富集与耐受的生理分子机制;(2)对比传统与新兴资源化技术的效率、成本及环境风险;(3)提出技术瓶颈与规模化应用策略,为构建“植物修复-资源化回收-高值再利用”的闭环产业链提供理论支撑,如图1所示。

2. 超积累植物的定义与特征

2.1. 核心定义

超积累植物可以在重金属浓度高的土壤中正常生长,并在地上部分积累重金属,其体内重金属含量可达一般植物的100倍以上,是植物修复技术的核心载体[1],大量结果表明,通过植物提取可以大幅降低土壤污染物的浓度,对于轻度或中度污染的土壤尤其如此。基本特征如下:(1)广泛采用的富集重金属

临界含量参考值, Au 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Sb、Cu、Ni、Pb、Co 和 As 为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 和 Mn 为 $10,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。(2) 转移特征: 植物地上部分重金属含量大于该植物地下部(根部)重金属含量。(3) 耐性特征: 植物对重金属具有较强的耐性, 即在污染程度较高的土壤中生存时, 植物的生物量没有明显下降。(4) 生物富集因子(即重金属元素浓度的芽土比) > 1 且易位因子(即重金属元素浓度的芽根比) > 1 [2]-[4]。

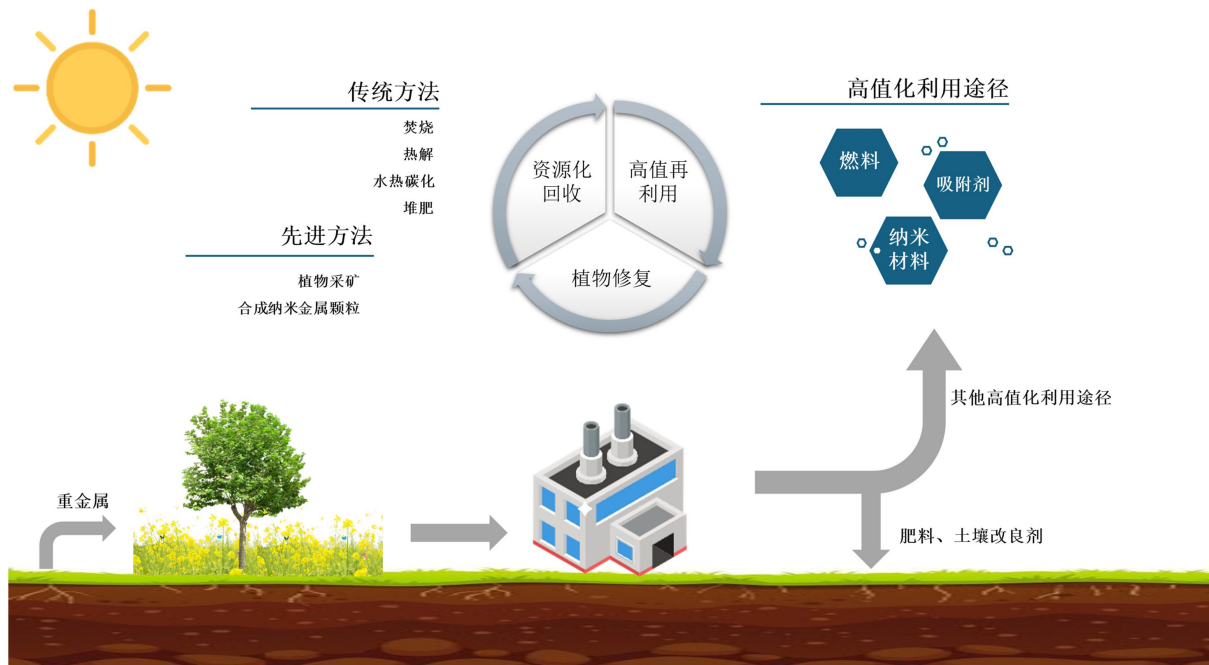


Figure 1. “Phytoremediation—resource recycling—high-value reuse” closed loop industrial chain
图 1. “植物修复 - 资源化回收 - 高值再利用” 闭环产业链

2.2. 生理机制及植物修复强化技术

超积累植物的重金属积累过程可分为两个关键环节。

根系吸收和体内转运机制: 与非超积累植物不同, 超积累植物不将金属离子限制在根液泡或细胞质中, 而是通过径向共向通道和主动加载到木质部中, 有效地将金属离子转移到枝条上, 并且几类蛋白质参与这种易位[5]。在易位过程中, 重金属转运 ATP 酶(HMA)在金属稳态和耐受性中起着重要作用。与非积累植物相比, 超积累植物根部这些转运蛋白的表达量显著升高。锌, 镉和镍被植物根部 ZIP 家族的特异性转运蛋白吸收; 砷酸盐是无机磷酸盐的类似物, 它通过存在于植物根部的高亲和磷酸盐转运蛋白吸收; 硒酸盐与硫酸盐的结构类似, 主要通过植物根细胞中的硫酸盐转运蛋白进入积累植物。的根系都很发达, 它与根际土壤环境间存在着复杂的相互作用, 根系分泌有机物质会降低根际 pH, 增加重金属溶解度[5]。而且部分超积累植物(如遏蓝菜)主动将根系伸向重金属富集区域, 而非避开, 从而增强吸收效率[6]。

解毒机制: 超积累植物能耐受重金属的超量积累且不影响自身正常代谢功能, 这基于其内在解毒机制将重金属转化为失活形态, 解毒过程通常发生在植物地上部分的液泡和细胞壁中。ABC、CDF、HMA 和 NRAMP 这几个转运蛋白家族参与调节这个解毒的过程, 液泡的酸性环境促进一些有机酸还参与螯合重金属离子。例如, 柠檬酸、组氨酸结合镍; 谷胱甘肽(GSH)可以螯合镉[5] [7]-[9]。

植物提取强化技术

生物可利用性提升：添加改良剂(EDTA (乙二胺四乙酸)、EGTA (乙二醇四乙酸)和 SDS (十二烷基硫酸钠))等以提高植物中金属的生物利用度，并促进金属在根和芽之间的运输[10]。

纳米技术辅助：零价铁纳米颗粒(nZVI)和二氧化钛纳米颗粒(TiO₂ NPs)可降低重金属毒性并提高植物吸收率[11]。

遗传改良

引入金属转运蛋白基因提升积累能力和重金属转运效率。吴海涛等人发现：SpHMA2 高表达时，拟南芥的 Cd 耐性及地上部分积累量均有明显的提升[12]。转基因杨树(*SmZIP11*)对 Zn、Cu 的转运效率较野生型提高 100%~150% [13]。

3. 资源化利用技术路径与价值评价

传统方法主要包括焚烧、热解、水热碳化等热处理方法和堆肥等微生物方法。先进的方法包括生物采矿、纳米材料的合成等[14]。

焚烧，即燃烧，被认为是最可行、简单、方便的方法，它可以将生物质的体积减少 90%以上，并几乎完全破坏其中的有机化合物。它可以在减少生物质的同时结合湿法冶炼和火法冶炼技术回收能源。然而，多环芳烃(PAH)、二恶英和呋喃等污染物从烟气中释放出来，或者它们积累在飞灰和底灰中，可能对环境造成二次污染[15]-[17]。焚烧被称为最便宜的加工方法，原因是这种方法会产生热量，从而避免使用其他污染更严重的燃料，但是灰分的处理成本很高，并且需要特殊且昂贵的填充地点。焚烧产生的烟气中二恶英、呋喃等即使在微量浓度下也具有剧毒，这需要对烟气进行深度的净化，以满足通常对垃圾焚烧施加的严格排放限制。

热解技术是在 300℃至 900℃之间无氧条件下对超积累植物进行热裂解，可将生物质分解成液体、固体和气体产物。热解分为传统热解(较慢)、快速热解和闪速热解。与焚烧法对比，整个过程在密闭条件下进行，在这种条件下，有害气体排放少，对大气的二次污染较轻，并且产物中包含的裂解气可作为燃料来使用。植物经过热解碳化处理的过程中，可通过优化温度和停留时间等因素实现重金属稳定化，降低浸出毒性，热解碳还可作为高效吸附剂用于废水和受污染土壤的处理，实现资源循环。不过，热解需控制温度(如 600℃以上)以稳定重金属，能耗较高；添加活化剂可能增加成本并影响残渣安全性。

水热碳化通常指的是在 180℃~260℃的温度和 2~10 MPa 的饱和压力下将生物质转化为富碳固体产品、气体和液体。水解作用是水热碳化过程中的主要反应，以有效去除木质纤维素生物质中 90%以上的碱金属(Ca、S、Mg、K)到液体产物流中，降低 HMs 的生物毒性和潜在生态风险[17]。相比于焚烧或热解，水热碳化具有能耗较低、无需预先干燥、能有效将重金属固化在水热碳中等优点被视为处理高含水率污染生物质的理想路径。但是，为了更好地固定某些重金属，可能需要添加稳定剂，水热液中可能有大量有机酸成分需中和处理，增加成本。

堆肥是在受控条件下通过微生物将有机物分解成稳定的腐殖质样产物的过程。它本质上是有机物在微生物作用下的矿化和腐殖化。堆肥通常在好氧条件下进行，通常包括加热、高温和成熟阶段。堆肥通常通过降低有机酸和铵离子的浓度以及材料中重金属的生物利用度来降低材料的植物毒性[18][19]。堆肥产物可改善土壤结构、提升肥力，增加农作物产量，间接提高周边土地价值。不过甲烷排放加剧全球变暖，若未收集利用需支付碳税，并且若堆肥含重金属(如 Cd、Ni)，会污染土壤并降低作物品质，需严格监控(增加成本)；且重金属超标时无法农用，丧失核心经济价值，重金属渗漏还可能污染地下水，引发生态赔偿。

金属被超积累植物吸收并通过焚烧，热解，水热碳化，硫化物沉淀，生物吸附工艺等方式处理后收

集产物的方式从植物中获得的过程称为植物采矿。目前，镉，铜，金，镍，铅等重金属已经被证明并且大量通过植物采矿的方式进行回收利用[20]。植物采矿通过超积累植物富集土壤重金属，收获后焚烧获得高金属品位“生物矿”，直接实现资源化。虽然植物采矿对金属回收行业的贡献很小，不过利用这种方法，除了作为土壤修复技术，可获得政府补贴或污染责任方支付以外，收获的金属，尤其是贵金属(金，银，铜等)也可带来巨大经济价值。

利用超积累植物合成纳米金属颗粒，即使在常温常压下，提取液中的活性生物分子也能够将金属离子还原，得到相应的金属纳米颗粒。与传统合成金属纳米颗粒的技术相比，利用超积累植物作为介导生物合成金属纳米颗粒是一种新的绿色资源回收方法。植物的每个部分都可用于纳米颗粒，包括叶子、花、种子、茎、果实等，甚至来自枯死和干燥植物的生物质也可用于纳米颗粒的合成[21]。利用超积累植物合成金属纳米颗粒方法如图 2 所示[22]。通过植物提取物作为生物还原剂制造金属纳米颗粒，相比于传统的物理和化学合成方法，合成的金属纳米颗粒更便宜、易于合成且环保，合成纳米颗粒的过程中，不仅可以通过焚烧后酸/铵浸或生物质直接萃取等方式从超积累植物中获取金属盐溶液，植物中多酚类物质、糖类物质、蛋白质以及生物酶等可以作为金属离子的还原剂或者产物纳米粒子的包覆剂和稳定剂。因此，在合成体系中无需引入外来化学还原剂即可实现纳米材料的均匀、稳定生长。这大幅减少了原材料的成本[23]。金属纳米颗粒的市场价值很高，成本可控的情况下，有着更高的发展潜力。

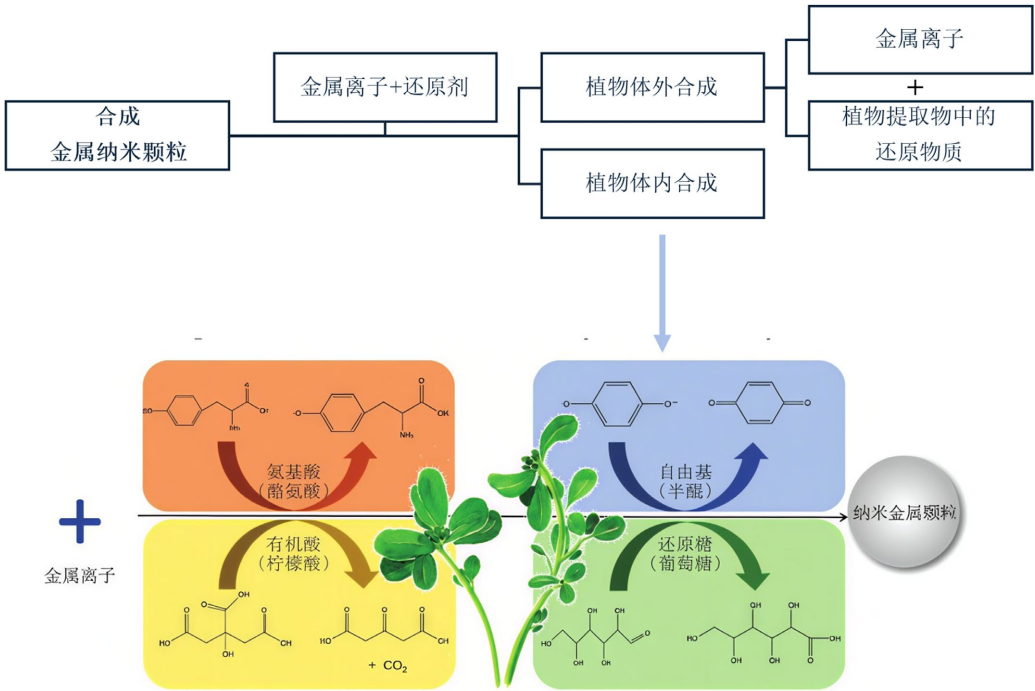


Figure 2. Synthesis method of nanometal particles
图 2. 纳米金属颗粒的合成方法

4. 综合比较与展望

本研究系统评述的多种超积累植物资源化利用途径均表现出显著环境效益与经济价值，但存在亟待突破的技术瓶颈，如表 1 所示。传统物理化学处理方法存在重金属二次释放、能耗高等固有缺陷；而新兴的联合处理技术通过优化反应条件，在重金属回收率和能源效率方面展现出明显优势，不过在资源回收方面仍需要进一步技术的探索。这些先进方法为构建绿色资源化技术体系提供了重要参考，但不同方

法的反应机理、适用植物种类及规模化参数仍需建立量化模型。

Table 1. Comparison of technical pathways for the resource utilization of over-accumulated plant resources
表 1. 超积累植物资源化技术路径对比表

技术路径	关键性能	经济成本	环境风险
焚烧	减容 90%+, 能量回收	低运行成本 高尾气处理成本	二噁英、飞灰等 二次污染
热解	多产物(气/液/固) 重金属稳定	中高能耗, 需控温	密闭系统污染小 需尾气处理
水热碳化	低能耗, 含水高适用 金属固化	中成本, 需稳定剂	液体副产物需处理
堆肥	改良土壤, 提升肥力	低成本, 周期长	甲烷排放 重金属渗漏风险
植物采矿	金属回收率高 贵金属富集	收益高, 政府补贴	焚烧阶段潜在污染
合成纳米材料	绿色合成, 高值产品	成本低, 工艺简单	过程清洁 无二次污染

此类研究将加速植物修复技术从实验室向工程化应用转化, 为解决我国每年产生的万吨级重金属超积累植物生物质提供系统解决方案。其理论成果可支撑构建“修复-回收-再利用”闭环产业链, 这对缓解战略金属资源短缺(如我国锑资源对外依存一度超 50%)具有战略价值。

参考文献

[1] Bai, S., Han, X. and Feng, D. (2023) Shoot-Root Signal Circuit: Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil. *Frontiers in Plant Science*, **14**, Article ID: 1139744. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1139744>

[2] 郭松明, 余海波, 袁龙义. 近 20 年我国重金属超积累植物种质资源筛选研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 96-108.

[3] 刘茵. 超积累植物在重金属污染土壤修复中的应用前景[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(6): 1492-1494.

[4] Li, J., Gurajala, H.K., Wu, L., van der Ent, A., Qiu, R., Baker, A.J.M., *et al.* (2018) Hyperaccumulator Plants from China: A Synthesis of the Current State of Knowledge. *Environmental Science & Technology*, **52**, 11980-11994. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01060>

[5] Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V.P. and Prasad, S.M. (2016) Heavy Metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and Ionomics. *Frontiers in Plant Science*, **6**, Article No. 1143. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>

[6] McGrath, S.P., Zhao, F.J. and Lombi, E. (2001) Plant and Rhizosphere Processes Involved in Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. *Plant and Soil*, **232**, 207-214. <https://doi.org/10.1023/a:1010358708525>

[7] DalCorso, G., Fasani, E. and Furini, A. (2013) Recent Advances in the Analysis of Metal Hyperaccumulation and Hypertolerance in Plants Using Proteomics. *Frontiers in Plant Science*, **4**, Article No. 280. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00280>

[8] Sytar, O., Ghosh, S., Malinska, H., Zivcak, M. and Brestic, M. (2020) Physiological and Molecular Mechanisms of Metal Accumulation in Hyperaccumulator Plants. *Physiologia Plantarum*, **173**, 148-166. <https://doi.org/10.1111/ppl.13285>

[9] Leitenmaier, B. and Küpper, H. (2013) Compartmentation and Complexation of Metals in Hyperaccumulator Plants. *Frontiers in Plant Science*, **4**, Article No. 374. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00374>

[10] Hasan, M.M., Uddin, M.N., Ara-Sharmeen, I., F. Alharby, H., Alzahrani, Y., Hakeem, K.R., *et al.* (2019) Assisting Phytoremediation of Heavy Metals Using Chemical Amendments. *Plants*, **8**, Article No. 295. <https://doi.org/10.3390/plants8090295>

[11] Rajput, V.D., Minkina, T., Upadhyay, S.K., Kumari, A., Ranjan, A., Mandzhieva, S., *et al.* (2022) Nanotechnology in

- the Restoration of Polluted Soil. *Nanomaterials*, **12**, Article No. 769. <https://doi.org/10.3390/nano12050769>
- [12] 吴海涛, 袁博, 刘佳兰, 等. 异源表达伴矿景天 SpHMA2 基因提高拟南芥对重金属镉的耐性及地上部分积累[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 655-661.
- [13] 杨钰颖, 陈舒鑫, 于淼, 等. SmZIP11 基因过表达增强杨树对重金属的吸收和转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(4): 689-701.
- [14] Wei, A., Jia, J., Chang, P. and Wang, S. (2024) Status of Sustainable Balance Regulation of Heavy Metals in Agricultural Soils in China: A Comprehensive Review and Meta-Analysis. *Agronomy*, **14**, Article No. 450. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030450>
- [15] 赵波, 钟道旭, 张亚平, 等. 超积累植物伴矿景天的焚烧处置及重金属浸出毒性研究[J]. 环境工程, 2022, 40(2): 93-99.
- [16] 朱文宇, 侯明明. 超积累植物的资源化利用[J]. 环保科技, 2009, 15(2): 44-48.
- [17] Su, W., Li, X., Zhang, H., Xing, Y., Liu, P. and Cai, C. (2021) Migration and Transformation of Heavy Metals in Hyperaccumulators during the Thermal Treatment: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 47838-47855. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15346-8>
- [18] Ghanney, P., Kugbe, J.X. and Anning, D.K. (2021) Role of Microbial Biomechanics in Composting with Special Reference to Lignocellulose Biomass Digestion. *Asian Journal of Biotechnology and Bioresource Technology*, **7**, 30-46. <https://doi.org/10.9734/ajb2t/2021/v7i130093>
- [19] Cui, W., Bai, Q., Liu, J., Chen, J., Qi, Z. and Zhou, W. (2023) Phytotoxicity Removal Technologies for Agricultural Waste as a Growing Media Component: A Review. *Agronomy*, **14**, Article No. 40. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010040>
- [20] Karman, S.B., Diah, S.Z.M. and Gebeshuber, I.C. (2015) Raw Materials Synthesis from Heavy Metal Industry Effluents with Bioremediation and Phytomining: A Biomimetic Resource Management Approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**, Article ID: 185071. <https://doi.org/10.1155/2015/185071>
- [21] Parthenium Leaf Extract Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles: A Novel Approach towards Weed Utilization. <https://www.scienceopen.com/document?vid=07bcfeac-6ecd-4378-88fa-58e2a56af353>
- [22] 金季也, 吴甘霖, 党菲. 植物介导金属纳米颗粒合成的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 664-672.
- [23] Ahmad, B., Shireen, F., Rauf, A., Shariati, M.A., Bashir, S., Patel, S., *et al.* (2021) Phyto-Fabrication, Purification, Characterisation, Optimisation, and Biological Competence of Nano-Silver. *IET Nanobiotechnology*, **15**, 1-18. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12007>