

重金属污染土壤生物修复技术研究进展

柴凤兰, 张帆, 吕颖捷 (开封市秸秆生物质绿色综合利用重点实验室, 河南应用技术职业学院, 河南开封 475000)

摘要 重金属污染土壤修复技术是世界性难题。阐述了近年来国内外涌现出的重金属污染土壤的生物修复技术, 如植物修复技术、动物修复技术、微生物修复技术及联合修复技术等, 分析了各种生物修复技术的优缺点, 并对今后重金属污染土壤生物修复技术的研究提出展望。

关键词 重金属; 污染土壤; 生物修复技术

中图分类号 X53; S154.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)20-0009-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.20.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Progress in Bioremediation Technique of Heavy-metal Contaminated Soil

CHAI Feng-lan, ZHANG Fan, LÜ Ying-jie (Kaifeng Key Laboratory of Green Comprehensive Utilization of Straw Biomass, Henan Technical Institute, Kaifeng, Henan 475000)

Abstract The remediation of heavy metal contaminated soil is a worldwide problem. Bioremediation technology emerged in recent years for heavy-metal contaminated soil is reviewed, including phytoremediation, animal remediation, micro-remediation and associated remediation. The advantages and disadvantages in soil bioremediation technology were analyzed. The prospect of soil bioremediation technology was put forward.

Key words Heavy metal; Contaminated soil; Bioremediation technique

土壤是由矿物质、动植物及微生物等组成的一个精细平衡的自然体系, 是国家的重要自然资源, 是农业可持续发展、人类和其他生命赖以生存的物质基础。土壤是一个开放的系统生物圈, 许多物质都能够自由进入该生物圈, 使土壤的物质构成发生改变。近年来, 由于工业化进程加快以及地膜、农药和化肥等过量使用等原因, 重金属、有机毒物进入土壤生物圈, 土壤污染比较严重, 破坏了土壤环境的自然微平衡, 直接威胁到人们的健康和生存。国家发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤污染以无机污染为主, 铅、汞、镉、铜、硒、镍、铬、锌为 8 种典型的重金属污染物, 其中镉的超标率达到 7.0%^[1]。重金属进入土壤环境, 土壤生态系统多样性会大大下降, 造成土壤结构破坏, 植物大面积死亡, 水土流失。土壤重金属污染具有长期累积性、不可逆转性和隐蔽性, 污染治理周期性强。截至目前, 大范围高效治理重金属污染土壤技术仍有待开发, 我国可利用耕地土地资源短缺, 土壤污染使这一问题变得更加突出, 严重地影响我国的农业生产和被污染当地人民的生活与生存^[2]。

2012 年, 我国设立并启动了土壤污染防治与修复重大科技专项, 2016 年国家出台《土壤污染防治行动计划》, 重点对重金属污染土壤的防控、监管、修复和研究提出了要求, 2018 年 8 月国家颁布了《中华人民共和国土壤污染防治法》, 土壤污染及治理问题得到高度重视, 污染土壤修复技术成为各学科研究的热点。该研究介绍了土壤重金属污染源, 重点阐述了近年来重金属污染土壤的生物修复技术研究进展, 分析了植物、动物及动植物等联合土壤修复技术的优缺点, 旨在促进重金属污染土壤生物修复技术研究的发展、促进生物修复

技术的应用推广。

1 土壤重金属污染源

土壤重金属污染是指由于重金属离子污染超过土壤生态系统负反馈调节上限, 造成土壤生态系统不可逆的破坏的现象。近年来, 农业面源和重金属污染农田综合治理和修复取得了不错的进展^[3]。土壤重金属污染源主要有农业污染源、工业污染源及其他。

1.1 农业污染源 农业活动引起的土壤重金属污染主要来自污水农灌、大气沉降、化肥农药等农用物资不规范施用等。如农业上常用的磷肥的原料磷矿石包含诸多有害元素, 如砷、铬、镉等有害重金属元素, 有些农药也含有砷、汞等有害重金属, 随着这些磷肥或农药的多年施用, 重金属在土壤中不断积累, 超出土壤的耐受力而形成污染。农民利用含有重金属超标的污水进行灌溉也是土壤重金属污染不可忽视的一个污染源^[4]。

1.2 工业污染源 工矿企业生产过程中因处理不当的含重金属的废液和废渣是导致土壤重金属超标主要污染源。研究表明, 矿产开采、冶炼和燃煤企业周围的土壤中, 铜、锌、铬、锰、砷和汞等积累较多, 而电镀企业、废旧电子产品及其后处理企业则是土壤中汞和镉的重要污染源^[4]。除了上述典型的污染源外, 石油化工生产中“三废”的排放也是重要的土壤重金属工业污染源。

1.3 其他污染源 随着人类的生活需求不断变化和人类活动范围加大, 土壤中的重金属污染源呈现多样化, 如大量汽车行使排出含重金属的废气、垃圾处理时重金属迁移, 研究发现, 人们的生活垃圾是土壤中 Cd 的重要源头^[4]。

目前, 我国土壤重金属污染呈区域性分布, 中部地区(河南、湖南、山西)土壤重金属污染较为严重, 土壤重金属污染率达到 34.21%, 西部地区(广西、贵州、云南)污染率为 18.21%, 广东、辽宁及江苏等东部地区污染率较低, 为 12.01%, 但全国土壤重金属污染率达 16.75%^[4]。土壤重金

基金项目 河南省高等学校自然科学重点项目(21B150007); 河南应用技术职业学院创新人才支持计划(2021-RC-01)。

作者简介 柴凤兰(1968—), 女, 河南滑县人, 教授, 博士, 从事农业环境污染治理研究。

收稿日期 2022-03-02

属污染程度和面积有逐年加重趋势,污染土壤修复和治理技术的开发已迫在眉睫。

2 重金属污染土壤的生物修复

早期重金属污染土壤修复技术主要采用物理修复方法和化学修复方法,物理修复方法有填埋法、客土法、复土法、刮土法以及稳定固定化的玻璃化技术等,化学修复法有氧化还原法、淋溶法、萃取法和络合剂固定法等。生物修复方法是近年发展起来的比较绿色的污染土壤修复方法。生物修复技术是指利用动物、植物和微生物吸收、降解和转化土壤中污染物,使污染物浓度降低到国家标准限值。生物修复技术一般分为植物修复技术、动物修复技术、微生物修复技术以及联合修复技术等^[5]。与普通的物理修复技术和化学修复技术相比,生物修复技术具有成本比较低、没有二次污染或二次污染少、比较绿色环保等特点,是目前重金属污染土壤治理的研究热点。

2.1 植物修复技术 植物修复技术是利用植物在生长周期内参与一系列吸收、挥发、降解等作用来减少土壤中有害有毒物浓度的方法。植物修复的机理主要有萃取、挥发、转移、分解和固定化等。目前研究较多的是利用超累积植物对重金属的吸收和迁移能力,将土壤中的一种或多种重金属转移到植物体内,通过对植物进行合理的后处理以降低土壤中的重金属浓度,从而修复污染土壤^[6-11]。

植物修复技术具有成本低、基本无二次污染、可以回收重金属等优点,是一种绿色环保型污染土壤修复方法,受到广泛的研究,植物修复技术得到了一定的应用。但是,植物修复技术也具有自身的缺点,比如,超累积植物的筛选周期长、符合多种重金属的超累积植物较少,涉及土壤化学、植物生物学、生态学、土壤微生物学、环境工程学等多学科多领域等,因此,重金属污染土壤的植物修复技术的工业化应用受到了一定的制约。

2.2 动物修复技术 动物修复技术是利用土壤动物对污染土壤中的重金属进行吸收、降解或转移,以降低土壤中重金属浓度的方法。目前所用的土壤动物主要是蚯蚓、线虫等无脊椎动物。近年来,我国学者研究发现,蚯蚓等土壤动物对土壤中的铅等重金属具有较强的富集作用^[12-15]。土壤动物如蚯蚓的养殖技术比较成熟,成本低、操作简单,对重金属污染土壤的修复具有一定的优势,但是由于土壤动物对重金属有一定的浓度耐受限值,超过土壤动物的重金属浓度耐受限值,不仅土壤动物生长受限,导致其死亡,而且动物代谢物会使重金属重回土壤。

2.3 微生物修复技术 土壤中含有大量的微生物,在重金属污染土壤中存在大量可以抵抗重金属的微生物如真菌、细菌和放线菌等,这些具有特定功能的微生物可以通过生物代谢改变土壤中重金属的形态,降低重金属毒性,改变重金属的可迁移性和生物可利用性^[16]。目前,已经分离出可以将六价铬还原为三价铬的微生物如埃希氏菌属、芽孢杆菌属、大肠杆菌、阴沟杆菌、假单胞菌属等^[17];大肠杆菌、酵母菌、枯草芽孢杆菌等对土壤中重金属离子 Cu、Cd 等具有比较好的修

复性能^[18-20];裂褶菌 GGHNO8-116 菌株、巴氏芽孢杆菌等对 Pb、Hg、Cr 等污染的土壤具有一定的修复性能。研究发现的菌株 *Solincola* 具有较高的金属富集能力,可以用于原位生物修复重金属污染土壤^[21]。

与动植物相比,微生物具有种类多、分布广、个体微小、比表面积大、适应性强、繁殖快、代谢能力强、容易培养等诸多优点,因此,被土壤治理工作者寄予厚望。但由于微生物活性受周围因素影响较大、分离困难、外来微生物与土著菌株竞争、修复机制不清晰和修复效率比较低等缺点,微生物修复技术大多处于田间试验与示范阶段。

2.4 联合修复技术 不论是物理修复技术、化学修复技术,还是近年来兴起的各种单一的生物修复技术,都有一定的局限性。因此,研究人员探索了污染土壤联合修复技术,如动植物联合修复技术、化学-植物联合修复技术、微生物-植物联合修复技术等。

2.4.1 动植物联合修复技术。 动植物联合修复技术是目前比较常用的重金属污染土壤修复方法之一,动物主要是蚯蚓等土壤中可自然生存的无脊椎动物,植物一般为对重金属离子可以有效富集的植物。研究发现,一般动植物联合修复重金属污染土壤可以取得比单一修复技术较好的修复效果。田伟莉等^[22]利用白三叶、黑麦草与蚯蚓联合修复镉、铜、铅等污染土壤,结果表明,两种植物和蚯蚓双方不仅在重金属富集作用互为促进,而且二者联合修复镉、铜、铅的效果比单一的修复方法的叠加效果高 11.5%、7.2%、5.0%,动植物联合修复 18 个月后,土壤中镉、铜、铅的浓度分别降低 92.3%、42.0%、24.7%,土壤中重金属浓度得到有效控制,更重要的是,动植物生长发育互相促进,土壤中微生物环境得到改善。杨扬等^[23]利用吊兰-蚯蚓联合修复镉污染土壤,研究表明,动植物联合修复效果比植物、动物单纯修复方法修复率分别提高 7.9%、14.8%。目前,由于可在较高浓度重金属污染土壤中生存的动物较少,因此,动植物联合修复重金属污染土壤的方法的推广应用受到限制。

2.4.2 化学植物联合修复技术。 化学植物联合修复技术是利用化学试剂协助,将土壤中的重金属转变为更有利于植物吸收、转移或挥发的组分,从而降低土壤中重金属浓度的方法。目前,化学植物联合修复技术是国内外重金属污染土壤修复研究的热点,如魏忠平等^[24]研究了草酸东南景天联合修复镉铅污染土壤的能力,结果发现,草酸可以大幅提高东南景天对土壤中镉铅的吸收富集,而且,草酸可以有效阻止土壤表层的重金属向土壤深层迁移,同时,草酸对土壤的酸碱度等组成影响较小。王雅乐^[25]利用乙二胺二琥珀酸(EDDS)联合孔雀草、龙葵和美洲商陆对镉污染土壤的修复效果,EDDS 可以有效提高 3 种植物对镉的富集效率,但 EDDS 对土壤的酸碱性等性质有一定的影响。在化学植物联合修复技术中常用的有机酸一般为柠檬酸、酒石酸、苹果酸、EDTA 等,它们或者与土壤中的重金属形成可以为植物吸收利用的金属络合物,将重金属转移到植物体内,或者有助于重金属迁移至土壤表层,提高植物对重金属的富集能力,降

低土壤中重金属的浓度^[26-28]。但是,不同的重金属对螯合剂的配位能力不同,而植物对化学螯合剂的耐受性差别较大,同时,有机酸等化学组分对土壤的结构也会有一定的影响,因此,化学植物联合修复技术的推广应用受到了一定的限制。

2.4.3 微生物-植物联合修复。利用微生物植物联合修复污染土壤是近些年来研究热点之一。研究发现,利用丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza, AM)与植物很好的寄生关系,菌根不仅不影响植物的生长,而且对重金属有很好的耐受性和比较好的吸附能力,菌根化的植物对土壤中重金属有很好的解毒功能^[29-30];耐铅菌株寡养单胞菌属与植物联合可以有效修复铅污染土壤^[31];而干酪乳杆菌、巨大芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌与包心芥菜联合可以较好地修复镉锌污染土壤^[32];拟青霉菌、嗜麦芽窄食单胞菌与黑麦草、黑心菊等植物联合可以有效促进植物对铅的吸收,提高对铅的富集能力,较好地修复铅污染土壤^[33]。

近年来,随着重金属污染土壤修复的紧迫性及修复效率要求的提高,新的土壤修复材料及方法不断涌现。生物炭来源丰富,且具有多孔结构,吸附性能比较强,利用生物炭或生物炭-微生物联合修复重金属污染土壤的研究不断涌现^[34-37]。为了达到既促进植物生长又降低土壤中重金属含量的目的,Hannan等^[38-39]提出了三联修复技术如螯合剂-菌根-植物修复技术、微生物-生物炭-植物修复技术等。利用蓝藻-生物炭-马齿苋协同修复重金属铬、铁、锌等污染土壤,研究表明,蓝藻和生物炭提高了马齿苋耐受系数和修复效率^[39]。生物炭、微生物与植物联合修复方法不仅提高了植物的富集效率,同时可以稳定土壤的微平衡,三联修复方法显示出了比较好的应用前景。

3 展望

土壤是人类赖以生存的基础,土壤污染已威胁到食品安全,影响到人们的身体健康,重金属污染土壤的修复目前仍没有特别有效的方法。物理修复和化学修复因为成本高、破坏土壤的有机结构,逐渐被淘汰。生物修复技术由于绿色环保、成本低,受到研究者和土壤治理者的青睐,目前研究结果基本仍处于实验室阶段。土壤治理涉及化学、生物、环境等多学科多领域,未来应该加强学科之间、领域之间的联合和沟通,开发联合生物修复技术,加快绿色高效土壤生物修复技术的推广应用,同时对于新技术的适用性推广应该给予政策扶持。在研究的深度上,应探究土壤中重金属在生物体内转移的分子机制,以期找到合适生物修复技术,这也是未来土壤治理研究的重点之一。

参考文献

[1] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J].农业环境科学学报,2019,38(10):2219-2238.
 [2] 仲可成,王倩瑜,贾琪源,等.我国大宗露天蔬菜产地土壤7种重金属元素污染分析[J].中国蔬菜,2021(9):33-40.
 [3] 熊炜,社会英,徐长春,等.农业面源和重金属专项实施进展与主要成效[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2105-2113.
 [4] 杨蕾.我国土壤重金属污染的来源、现状、特点及治理技术[J].中国资源综合利用,2018,36(2):151-153.

[5] 王兴利,王晨野,吴晓晨,等.重金属污染土壤修复技术研究进展[J].化学与生物工程,2019,36(2):1-7,11.
 [6] 张杏锋,吴萍,冯健飞,等.超富集植物与能源植物间作对Cd、Pb、Zn累积的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(7):1481-1491.
 [7] WAN T Y, DONG X W, YU L H, et al. Comparative study of three *Pteris vittata*-crop intercropping modes in arsenic accumulation and phytoremediation efficiency[J/OL]. Environmental technology & innovation, 2021, 24 [2021-07-25]. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101923.
 [8] MASINIRE F, ADENUGA D O, TICHAPONDWA S M, et al. Phytoremediation of Cr(VI) in wastewater using the vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) [J/OL]. Minerals engineering, 2021, 172 [2021-07-25]. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107141.
 [9] 谢运河,纪雄辉,吴家梅,等.镉污染土壤“三高”富集植物筛选与修复成本分析[J].环境科学与技术,2020,43(S1):116-121.
 [10] 戴学斌,许瑜兴,邓义,等.土壤酸胁迫对黑麦草生长生理及镉富集特征的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):389-396.
 [11] 郑君健,刘杰.Mn超富集植物商陆的多倍体诱导与修复性能[J].湖北农业科学,2013,52(19):4623-4626.
 [12] 蔡永刚,郭志瑶,李梦雅,等.蚯蚓粪、牛粪对镉铜复合污染土壤中白菜生长和镉铜积累的影响[J].江苏农业科学,2016,44(9):452-455.
 [13] 刘制制,黄沈发,唐浩.蚯蚓活动对汞污染土壤植物修复效果的影响[J].环境污染与防治,2018,40(8):866-869,874.
 [14] 徐坤,刘雅心,成杰民,等.蚯蚓对印度芥菜修复Zn、Pb污染土壤的影响[J].土壤通报,2019,50(1):203-210.
 [15] 刘翔宇.外源添加剂对蚯蚓修复Cd污染土壤效果研究[D].西北农林科技大学,2021.
 [16] 廖强,刘爱菊.土壤重金属污染状况与修复技术研究进展[J].山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(4):7-11.
 [17] 李琪,邢颖娜,杜逢慧,等.枯草芽孢杆菌对早熟禾和紫花苜蓿修复镉污染土壤的强化作用[J].科学技术与工程,2021,21(17):7385-7390.
 [18] WU C, LI F, YI S W, et al. Genetically engineered microbial remediation of soils co-contaminated by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Advances and ecological risk assessment[J/OL]. Journal of environmental management, 2021, 296 [2021-07-25]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113185.
 [19] 池耀威,王晓雅,初少华,等.耐镉促生根瘤菌的鉴定及其对镉的吸附特性[J].农业环境科学学报,2021,40(4):791-800.
 [20] 陈敏浩,李亚飞,李博文,等.微生物诱导碳酸盐沉淀对土壤中Pb污染稳定化的效果研究[J].有色金属工程,2020,10(12):128-134.
 [21] BENMALEK Y, HALOUANE A, HACENE H, et al. Resistance to heavy metals and bioaccumulation of lead and zinc by *Chryseobacterium solincola* strain IYB-R12T isolated from soil[J]. International journal of environmental engineering, 2014, 6(1):68-77.
 [22] 田伟莉,柳丹,吴家森,等.动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用[J].水土保持学报,2013,27(5):188-192.
 [23] 杨扬,赵美微,苗利军.重金属镉污染土壤的动植物联合修复:以吊兰-蚯蚓为例[J].现代盐化工,2020,47(6):59-61.
 [24] 魏忠平,谷雷严,罗庆,等.草酸强化超富集植物东南景天修复镉铅污染土壤研究[J].沈阳农业大学学报,2020,51(6):734-740.
 [25] 王雅乐.钝化阻控与超富集植物提取对碱性镉污染土壤修复效应及机理研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
 [26] 罗昱.螯合剂及有机酸强化凤尾鸡冠花修复Pb、Cd污染土壤研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
 [27] 吴仁杰,陈银萍,曹雯婕,等.营养元素与螯合剂强化植物修复重金属污染土壤研究进展[J].中国土壤与肥料,2021(5):328-337.
 [28] 庄静静,郭群.柠檬酸-美人蕉体系对铅镉复合污染土壤的修复效果[J].甘肃农业大学学报,2020,55(5):143-151.
 [29] HAN Y, ZVEUSHE O K, DONG F Q, et al. Unraveling the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium uptake and detoxification mechanisms in perennial ryegrass (*Lolium perenne*) [J/OL]. Science of the total environment, 2021, 798 [2021-08-20]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149222.
 [30] YANG X, QIN J H, LI J C, et al. Upland rice intercropping with *Solanum nigrum* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil[J/OL]. Journal of hazardous materials, 2021, 406 [2021-08-20]. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124325.
 [31] 吴海维.耐铅微生物与植物联合修复环境中铅污染的研究[D].合肥:安徽建筑大学,2021.

- [67] 王小青,韩健,文杨,等.呈色机制不同的桃叶片花色苷积累及合成相关基因表达的季节性差异[J].南京农业大学学报,2016,39(6):924-931.
- [68] 林兵,陈艺芝,钟准钦,等.荷兰鸢尾“玉妃”花色变异关键结构基因分析[J].中国农业科学,2021,54(12):2644-2652.
- [69] 范美,王小德,陈斌,等.海岛罗汉松嫩叶叶色变化转录组分析[J/OL].分子植物育种,2021-05-19[2021-07-15].https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210518.1759.026.html.
- [70] 李卫星,杨舜博,何智冲,等.植物叶色变化机制研究进展[J].园艺学报,2017,44(9):1811-1824.
- [71] 江慧欣.白桦黄叶突变体的鉴定及 *BpGLK1* 功能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2019:97.
- [72] 金冬雪.转 *BpGLK1* 白桦生长、叶色变异分析及环境安全性初步评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2021:45.
- [73] 申建双.金叶连翘叶片呈色分子机制研究[D].北京:北京林业大学,2019:63.
- [74] 李艺迪.银中杨 *PaGLK* 基因的克隆及遗传转化研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020:38.
- [75] 于忠洋.白桦 *BpSE* 和 *BpR2R3-MYB* 家族基因鉴定及 *BpSE4* 和 *BpMYB15* 基因克隆分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2021:48.
- [76] 陈可欣.紫薇叶片花青素合成相关基因 *LiANS*, *LiF3H*, *LiMYB44* 克隆及转基因初步研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021:48.
- [77] 赵荣.蜡梅类黄酮合成相关转录因子 *CpbHLH1* 和 *CpMYB111* 的功能解析[D].武汉:华中农业大学,2020:57.
- [78] 蒋琦,高广春,吴霁冀,等.*WRKY* 转录因子调控植物次生代谢的研究进展[J/OL].分子植物育种,2021-12-03[2021-12-15].https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211201.1439.006.html.
- [79] 高苗蕊,赵瑜琦,宗毓铮,等.2025 杨及其 3 种芽变红叶杨光合生理和生态适应性研究[J].西北林学院学报,2020,35(2):102-107.
- [80] 王少杰,付宇辰,冷平生,等.7 种彩叶树种光合特性分析[J].河北林果研究,2017,32(S1):269-276,283.
- [81] 成方斌.彩叶植物与绿叶植物春季干物质积累量比较研究[J].内蒙古林业调查设计,2020,43(4):90-93.
- [82] 李映雪,谢晓金,李永秀,等.3 种彩叶植物光合生理特性的差异[J].东北林业大学学报,2009,37(5):64-66.
- [83] 俞继红.3 种彩叶植物的光合特性比较[J].西北林学院学报,2014,29(4):21-25.
- [84] 朱晓静,尚爱芹,杨敏生,等.中华金叶榆子代苗光合特性及叶片呈色机制探讨[J].西北植物学报,2014,34(5):950-956.
- [85] 王艺斐,姜泽东,张放,等.银杏叶片黄化过程中光合色素含量和叶绿素荧光参数的变化特征研究[J].西南农业学报,2020,33(10):2220-2224.
- [86] 余旋.4 种彩叶植物光合生理特性研究[D].雅安:四川农业大学,2007:40-42.
- [87] HORMAETXE K, BECERRIL J M, FLECK I, et al. Functional role of red (retro)-carotenoids as passive light filters in the leaves of *Buxus sempervirens* L.: Increased protection of photosynthetic tissues[J]. Journal of experimental botany, 2005, 56(420): 2629-2636.
- [88] 姜雪茹,彭金根,郭翎,等.小叶黄杨冬季叶片呈色与其类胡萝卜素及活性氧关系研究[J].北京林业大学学报,2015,37(6):93-99.
- [89] 李瑾瑾,张强,方炎明.植物叶黄素循环及其光保护作用的研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(5):1-3,17.
- [90] 杨贤松.银杏叶片衰老过程中叶绿体光合能力的变化[J].牡丹江师范学院学报(自然科学版),2019(4):50-54.
- [91] 王亚芸,王立英,任建武,等.金叶榆不同叶位叶片呈色生理机制研究[J].中国农学通报,2014,30(16):22-29.
- [92] 庄猛,姜卫兵,翁忙玲,等.金叶女贞与小叶女贞光合特性的比较研究[J].南京农业大学学报,2007,30(2):39-43.
- [93] NEILL S O, GOULD K S. Anthocyanins in leaves: Light attenuators or antioxidants? [J]. Functional plant biology, 2003, 30(8): 865-873.
- [94] TSUDA T, SHIGA K, OHSHIMA K, et al. Inhibition of lipid peroxidation and the active oxygen radical scavenging effect of anthocyanin pigments isolated from *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Biochemical pharmacology, 1996, 52(7): 1033-1039.
- [95] 刘平,宋岩,陆秀君,等.美国红枫和元宝枫幼叶春季转色期生理特性研究[J].生态环境学报,2018,27(3):452-458.
- [96] 俞正超,刘晓涛,郑婷婷,等.2 种强光下生长的 4 种木本植物叶片的光保护物质积累能力与光合能力的关系[J].华南师范大学学报(自然科学版),2019,51(3):62-69.
- [97] 朱秀红,杨金福,温道远,等.彩叶杨树叶片中花色苷的光保护作用[J].西南农业学报,2020,33(5):958-965.
- [98] 屈莹,谢久凤,王珂,等.低温及光照对四季海棠叶片花色苷合成的诱导及调控机理[J].河南农业大学学报,2018,52(3):342-349.
- [99] 黄嘉雯,陈小阳,刘涛利,等.花色苷合成关键调节基因的研究进展[J].分子植物育种,2019,17(11):3602-3608.

(上接第 8 页)

- [40] 雷勇.对虾白斑综合症口服卵黄抗体的研制[D].长沙:湖南农业大学,2006.
- [41] LU Y N, LIU J J, JIN L J, et al. Passive protection of shrimp against white spot syndrome virus (WSSV) using specific antibody from egg yolk of chickens immunized with inactivated virus or a WSSV-DNA vaccine[J]. Fish & shellfish immunology, 2008, 25(5):604-610.
- [42] KIM D K, JANG I K, SEO H C, et al. Shrimp protected from WSSV disease by treatment with egg yolk antibodies (IgY) against a truncated fusion protein derived from WSSV[J]. Aquaculture, 2004, 237(1/2/3/4): 21-30.
- [43] YI L Z, QIN Z D, LIN H Z, et al. Features of chicken egg yolk immunoglobulin (IgY) against the infection of red-spotted grouper nervous necrosis virus[J]. Fish & shellfish immunology, 2018, 80:534-539.
- [44] 林鑫,伊丽竹.利用卵黄抗体预防罗氏沼虾肌肉白浊病[J].科学养鱼,2015(5):57-58.
- [45] LIU Z X, KE H, MA Y P, et al. Oral passive immunization of carp *Cyprinus carpio* with anti-CyHV-3 chicken egg yolk immunoglobulin (IgY) [J]. Fish pathology, 2014, 49(3):113-120.
- [46] 李思泉,李娜,罗玉双,等.草鱼细菌性烂鳃病原菌的分离及其特异性卵黄抗体的初步研究[J].贵州畜牧兽医,2019,43(3):37-42.
- [47] 王帅兵,熊良伟,朱善元,等.嗜水气单胞菌 *Aer* 毒素和胞外蛋白酶卵黄抗体的制备[J].江苏农业学报,2012,28(1):135-139.
- [48] YOUNG C A, SILVERSIDES F G, JONES S R M. Chicken-derived IgY recognizes developing and mature stages of *Loma salmonae* (Microsporidia) in Pacific salmon, *Oncorhynchus* spp. [J]. Aquaculture, 2007, 273(4): 398-404.
- [49] ZHANG L P, LI D F, LIU L G, et al. Development of a colloidal gold immunochromatographic strip for the rapid detection of soft-shelled turtle systemic septicemia spherical virus [J]. Journal of virological methods, 2015, 221:39-45.
- [50] CAMPORA C E, HOKAMA Y, YABUSAKI K, et al. Development of an enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of ciguatera toxin in fish tissue using chicken immunoglobulin Y [J]. Journal of clinical laboratory analysis, 2008, 22(4): 239-245.

(上接第 11 页)

- [32] 李一曼.细菌强化包心芥菜修复重金属 Cd、Zn 复合污染土壤研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [33] 孙楠,张胜爽,张凌云,等.植物与微生物协同修复土壤铅污染修复效应[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):122-128,154.
- [34] 王志朴,热则耶,张大旺,等.污泥基生物炭用于土壤中 Cr 的钝化及作用机制分析[J].环境工程,2021,39(5):178-183.
- [35] 任晓斌.球形红细菌 H 菌株和生物炭联合修复铬污染土壤的研究[D].太原:中北大学,2021.
- [36] 张倩茹,冀琳宇,高程程,等.改性生物炭的制备及其在环境修复中的应用[J].农业环境科学学报,2021,40(5):913-925.
- [37] 夏梦莲,樊杰,雷学文,等.微生物与生物炭复合修复铬污染土壤的室内试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(18):7567-7572.
- [38] HANNAN F, ISLAM F, HUANG Q, et al. Interactive effects of biochar and mussel shell activated concoctions on immobilization of nickel and their amelioration on the growth of rapeseed in contaminated aged soil [J/OL]. Chemosphere, 2021, 282[2021-08-20].https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130897.
- [39] ZANGANEH F, HEIDARI A, SEPEHR A, et al. Bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane (*Portulaca oleracea* L.) [J]. Environmental science and pollution research, 2022, 29(4): 6040-6059.