



徐润钰, 许书林, 高游慧, 黄雪霜, 滕丽秀, 陈春虹, 王小芬. 基于文献计量的农用酵素处理污水研究现状及热点分析[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 164-176.

XU Runyu, XU Shulin, GAO Youhui, HUANG Xueshuang, TENG Lixiu, CHEN Chunhong, WANG Xiaofen. Research status and hot spot analysis of agricultural Jiaosu treatment of sewage based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 164-176.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.17

基于文献计量的农用酵素处理污水研究现状及热点分析

徐润钰¹ 许书林^{1,2} 高游慧¹ 黄雪霜¹ 滕丽秀¹ 陈春虹³ 王小芬^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 三亚研究院, 海南 三亚 572000;

3. 义源(上海)节能环保科技有限公司, 上海 200083)

摘要 为探究农用酵素在污水处理方面的应用方法和实际效果,并探讨出水用于农田灌溉的可行性,利用可视化软件VOSviewer对CNKI和Web of Science数据库中农用酵素处理污水的1 952篇相关文献进行综合分析。结果表明:1)国内外农用酵素处理污水的研究主要集中在农用酵素发酵工艺、农用酵素有效组分、污染物去除效果、酵素添加量及处理条件、对环境的影响和应用实例等方面。2)农用酵素是通过微生物厌氧发酵而形成的以有益微生物、有机酸、多种水解酶等活性代谢成分为一体的复杂而稳定的生态系统,可以提高污水中污染物的降解效率,处理后的污水达到了农田灌溉水质的标准。3)农用酵素作为1种低成本的绿色环保制剂近年来逐渐被用于污水处理,又因生活污水中含有氮磷钾等矿质元素而具有较丰富的养分和灌溉用水潜力,将乡村生活污水经酵素处理后用于农田灌溉,可以有效解决农业水资源短缺和乡村生活污水污染环境的问题。综上,在全球水资源短缺的情况下,农用酵素处理污水作为一项新型的高效低成本污水处理和循环再利用的方式,从农业可持续发展的需求出发构建生活污水等资源还田的模式,为农田生态系统物质循环健康发展提供新思路。

关键词 农用酵素; 污水处理; 废弃物利用; 农田灌溉

中图分类号 X712

文章编号 1007-4333(2024)06-0164-13

文献标志码 A

Research status and hot spot analysis of agricultural Jiaosu treatment of sewage based on bibliometrics

XU Runyu¹, XU Shulin^{1,2}, GAO Youhui¹, HUANG Xueshuang¹, TENG Lixiu¹,

CHEN Chunhong³, WANG Xiaofen^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya 572000, China;

3. Yiyuan (Shanghai) Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd, Shanghai 200083, China)

Abstract In order to explore the application methods and practical effects of agricultural Jiaosu in sewage treatment, and to explore the feasibility of using effluent for farmland irrigation, this study used the visualization software VOSviewer to comprehensively analyze 1 952 relevant literatures on agricultural Jiaosu in CNKI and Web of Science databases. The results showed that: 1) The research directions of sewage treatment with agricultural Jiaosu at home and abroad mainly focus on the fermentation process of agricultural Jiaosu, effective components of agricultural Jiaosu, pollutant removal effect, Jiaosu addition and treatment

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划(2021YFD1901103)

第一作者: 徐润钰(ORCID:0009-0008-1457-6701), 硕士研究生, E-mail: runyuxu@cau.edu.cn

通讯作者: 王小芬(ORCID:0000-0003-3543-1073), 教授, 主要从事生物质资源农用转化研究, E-mail: wxiaofen@cau.edu.cn

conditions, environmental impact and application examples. 2) Agricultural Jiaosu is a complex and stable ecosystem formed by anaerobic fermentation of microorganisms, which integrates beneficial microorganisms, organic acids, a variety of hydrolases and other active metabolic components. It can improve the degradation efficiency of pollutants in sewage. The treated sewage meets the standard of farmland irrigation water quality. 3) As a low-cost and green preparation, agricultural Jiaosu has been gradually used in sewage treatment in recent years. Because domestic sewage contains mineral elements such as nitrogen, phosphorus and potassium, it has rich nutrients and irrigation water potential. The use of rural domestic sewage after Jiaosu treatment for farmland irrigation can effectively solve the problems of agricultural water shortage and rural domestic sewage pollution. To sum up, under the situation of global water shortage, as a new high-efficiency and low-cost way of sewage treatment and recycling, agricultural Jiaosu treatment of sewage is to build a model of returning domestic sewage and other resources to the farmland from the demand of agricultural sustainable development, which provides a new idea for the healthy development of farmland ecosystem.

Keywords agricultural Jiaosu; sewage treatment; waste utilization; irrigation of farmland

水资源短缺的问题一直存在于我国的农业生产过程中,随着人们生活水平的提高,生活用水量也逐年上升,这锐化了全社会水资源供需矛盾^[1]。2022年国民经济和社会发展统计公报的有关数据表明:我国目前全年水资源总量为26 634亿m³,居世界第六位,但我国的人均水资源量仅为2 240 m³,只达到了世界人均水资源量的1/4,属于严重缺水国家^[1]。最新的《2022年中国水资源公报》^[2]数据显示:我国供水总量和用水总量均为5 998.2亿m³,其中农业用水量就达到3 781.3亿m³,占全国用水总量的63%,且在逐年上升。在我国总体水资源储量逐年下降的情况下农业生产相关的用水量竟连年攀升,已有研究表明目前中国水资源短缺的情况已严重影响到了农业生产^[3],因此对水资源高效循环利用的需求日益迫切。

党的二十大提出和美乡村建设,和美乡村强调乡村的内在之美,因此改善乡村人居环境和提高村民生态环保意识变得尤为重要,其中乡村污水治理也是实施乡村振兴战略的重要举措。随着农村经济的不断发展和村民生活现代化水平的不断提高,化工类洗涤剂的广泛使用逐渐取代了传统洗涤方式,又由于传统的污水处理方式高投资、高能耗、高污染,绝大部分村庄未建设污水处理厂,居民生活和生产活动产生的污水未经处理直接排放的问题较为显著^[4-5](图1)。部分村庄缺少垃圾处理站,大量农田废弃物乱堆乱放,被雨水浸泡后垃圾渗滤液通过地表渗漏至地下,随地下水进入河流造成水体污染,这些都对环境和居民的健康造成了严重危害^[6]。因此,必须引进生活污水高效低成本的处理和循环再利用技术,防止对环境、村民健康和农业

生产造成直接影响。

将乡村生活污水集中处理后还田,既能解决农田缺水的问题,又能解决环境污染问题,同时生活污水中含有的氮磷钾等养分使其具有较丰富的养分和灌溉用水潜力^[7]。但有很多人担心生活污水中过剩的养分还田会造成更大的环境污染问题^[8],以及传统污水处理的成本过高、操作复杂不便于在乡村推广。农用酵素是可以将农田废弃物资源化、成本低廉、操作简便、绿色环保的微生物制剂,既能净化乡村生活污水,又能抗病抗虫、改良土壤、促进作物生长,成为治理乡村生活污水的首选(图1)。

目前已经有多项研究表明,农用酵素的合理运用能够实现污水中大部分污染物的有效去除^[8-14],可以安全地用于农田灌溉。本研究利用文献计量软件VOSviewer(V1.6.20)分析中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)核心合集数据库中农用酵素处理污水的1 952篇相关文献,从研究热点、农用酵素的发酵工艺、有效组分、农用酵素处理污水的应用实例和生态效益五个方面进行总结归纳,并创新性地提出将出水用于农田灌溉以解决水资源短缺的危机,旨在探讨农用酵素处理污水的实际效果以及出水用于农田灌溉的可行性,为构建乡村生活污水循环利用体系,解决农田水资源短缺问题提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

选用CNKI和Web of Science核心合集数据库作为数据来源。英文文献在Web of Science核心合集集中的SCI-EXPANDED、SSCI、CPCI-S、CPCI-

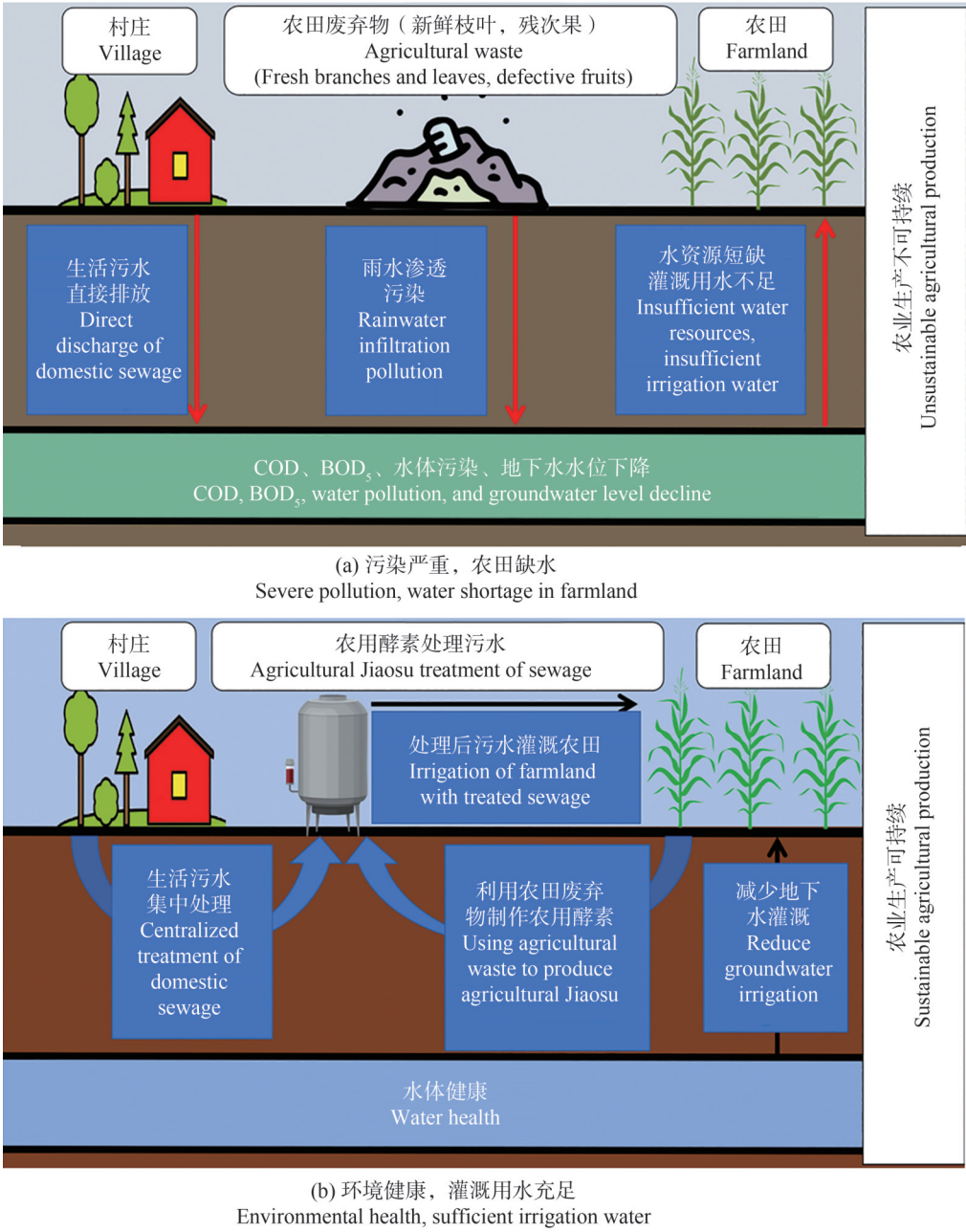


图1 农用酵素处理污水与农田灌溉相结合对农业生产影响

Fig. 1 Impact of combining agricultural Jiaosu treatment of wastewater with farmland irrigation on agricultural production

SSH、IC 和 CCR-EXPANDED 库中检索。检索式为：(TS=(sewage) AND (TS=(enzyme) OR TS=(Jiaosu))) AND DT=(Article)，最终得到有效文献 1 933 篇。中文文献在 CNKI 数据库中检索，检索关键词为：‘污水’‘酵素’，剔除无作者信息文献和会议文献，最终得到有效文献 19 篇。

1.2 研究方法

利用可视化软件 VOSviewer 对检索到的文献

数据进行分析，绘制文献关键词共现网络图，通过关键词对农用酵素处理污水的研究热点和进展进行总结和归纳，并探讨农用酵素出水用于农田灌溉的可行性。

2 结果与分析

2.1 研究热点

由图 2 可知，国内农用酵素处理污水的研究

方向主要集中在农用酵素发酵工艺、农用酵素有效组分、污染物去除效果、酵素添加量及处理条件、对环境的影响和农用酵素处理污水的应用实例

例等方面；国外的研究方向主要集中在农用酵素发酵工艺、农用酵素有效组分、对环境的影响和应用实例方面。

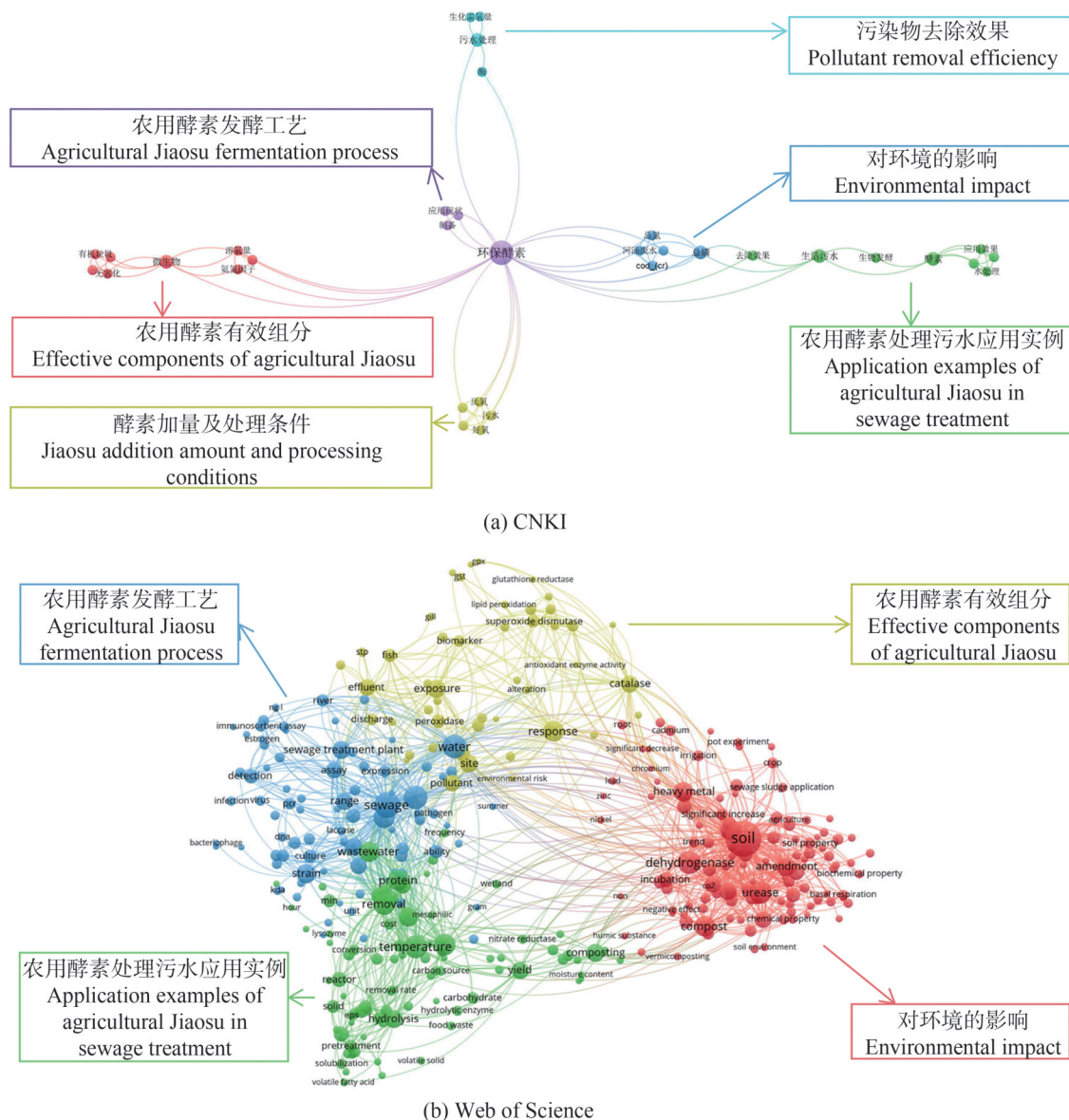


图 2 CNKI 和 Web of Science 数据库中关键词共现网络图

Fig. 2 Keyword co-occurrence network diagram in CNKI and WOS databases

2.2 农用酵素发酵工艺

农用酵素是以乳酸菌、酵母菌等多菌种复合发酵果蔬制成的,酵素中的菌群能够产生活性很强的水解酶,可以迅速催化分解果蔬中的有机物,形成富含有机酸、醇类、酚类、酶等代谢产物及有益微生物的液体制剂^[15]。中国工业和信息化部给出了农用酵素的定义,即以植物为主要原料,添加或不添

加辅料,经过微生物发酵制成的含有特定生物活性成分的,可用于养殖业、种植业和土壤改良的酵素发酵产品^[16-17]。

工业上通常使用液态酵素生产工艺来制作农用酵素^[8],即以 $m(\text{红糖}):m(\text{新鲜果蔬}):m(\text{水})=1:3:10$ 在罐中依次添加物料,密封厌氧发酵 3 个月。李仲树等^[18]把新鲜的果蔬经过粉碎处理,加工成液

态产品并加入复合型果胶酶酶解后,在18~25℃下接种菌剂,主要为酿酒酵母,进行为期7~15 d的发酵,之后接种醋酸菌进行为期10~30 d的二次发酵,得到活性较高的酵素发酵液。方晟等^[19]使用萝卜叶、白菜叶和莴笋叶为原料,按照 $m(\text{红糖}):m(\text{原料}):m(\text{黄酒米浆水})=1:3:9$ 的比例,在常温下置于消毒后干燥的发酵罐中发酵制作农用酵素。杨小幸等^[20]以苹果为原料,先将苹果用纯净水洗净并晾干,将白砂糖在紫外灯下照射45 min,按 $m(\text{苹果}):m(\text{白砂糖})=2:1$ 混合封入已灭菌的玻璃瓶中,置于暗处,在10~20℃下发酵28 d,就制成了活性较高的农用酵素。黄丽真^[21]以厨余垃圾中的果蔬皮、菜尾等不可食用的鲜垃圾为原料制作农用酵素,以 $m(\text{红糖}):m(\text{厨余鲜垃圾}):m(\text{自来水})=1:3:10$ 的比例添加物料,制作时可先将红糖和水按比例混合,再陆续添加厨余鲜垃圾,以最后添加厨余鲜垃圾的日期为发酵起始时间,密封发酵3个月及以上即可发酵成功。目前在实际生产中,为了节约成本引入了不加水不加糖酵素的概念,即将葡萄、西瓜等含糖量和含水量较高的原料粉碎后直接装罐密封发酵3个月,这样做减少了糖和水的投入,能够更加经济环保地实现污水治理。

2.3 农用酵素中有效组分

在农用酵素厌氧发酵的过程中,酵母菌和乳酸菌等有益菌群以投入的果蔬和红糖等原料中的糖分为碳源进行大量繁殖,并产生有机酸、水解酶等代谢产物^[22]。农用酵素在促进植物生长、改良土壤、提高作物抗逆能力和降解污水中的有机污染物等方面均有积极作用。其中酵母菌、乳酸菌等有益菌群和水解酶在降解污水中有机污染物方面有直接的作用,有机酸可抑制杂菌和保障有益菌群优势地位,农用酵素中少量的矿物养分和植物激素等在后续灌溉农田时可起到补充养分和促进作物生长的作用。

2.3.1 有机酸

在农用酵素的发酵过程中,酵母菌、乳酸菌等微生物占据优势,这些微生物利用植物源中的有机物质通过自身的代谢途径,可以产生乳酸、甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、柠檬酸和氨基酸等有机酸^[23-24]。Gao等^[23]研究表明,在发酵的前2~5 d,还原糖迅速

转化为乳酸、甲酸、乙酸、丙酸和丁酸,有机酸的浓度呈波动上升趋势,在60 d后有机酸趋于稳定。这些酸性物质具有抑制杂菌的作用,可以在污水这个复杂体系中保证乳酸菌、酵母菌等有益菌群的优势地位,同时在后续用于农田灌溉中也可以活化土壤中的矿质元素,加速植物对矿质养分的吸收和利用^[24-25],从而达到抗病促生的作用。

农用酵素基于其丰富的有机酸,表现出对大部分杂菌的抑制作用,如大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、沙门氏菌(*Salmonella*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)等^[26-28],为农用酵素中乳酸菌和酵母菌等优势菌群提供了良好的生存环境,促进其快速生长和繁殖,进而占据污水中的优势生态位^[29],再通过一系列代谢过程降解和转化污水中的有机污染物,使微生物净化水质的效果得到提升。

2.3.2 有益菌群

在农用酵素厌氧发酵的3个阶段中,占据优势地位并在物质代谢和能量转化中起主要作用的是酵母菌和乳酸菌两类微生物。Gao等^[23]分别对4种不同原料发酵而成的农用酵素进行了研究发现:农用酵素中的优势细菌在门水平上为变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidetes)三大类,而在属水平上,为醋酸菌属(*Acetobacter*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、解氢芽孢杆菌属(*Hydrogenibacillus*)和*Prevotella_1*五大类。佟玉洁^[30]自制的由鲜蔬果厨余垃圾发酵而成的农用酵素中主要微生物为厌氧菌、酵母菌。任秀秀^[31]等以厨余垃圾为原料经发酵制成农用酵素,经分离纯化后鉴定出3株优势菌,主要是酵母和芽孢杆菌两大类,分别为酒香酵母菌(*Brettanomyces custersianus*)、苏云金杆菌(*Bacillus thuringiensis*)和蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)。凌空等^[32]和杜丽平等^[33]研究了农用酵素中的优势酵母,分别从3种不同发酵周期的农用酵素和木瓜酵素中分离筛选出了毛榛毕赤酵母(*Pichia mandshurica*)、毕赤酵母(*Pichia pastoris*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)。

农用酵素因其丰富的微生物群落结构具有多

种代谢反应通路,在处理污水中的有机污染物方面具有巨大潜力。Gao等^[23]的研究结果显示农用酵素的微生物群落主要有三大代谢途径,分别是碳水化合物代谢、辅因子和维生素代谢和氨基酸代谢。

农用酵素中的有益微生物以污水中的有机污染物为物质和能量的来源,有机物在相关水解酶的作用下被分解成小分子,一部分在水解酶的催化下被彻底分解成 H_2O 和 CO_2 并产生能量供微生物生命活动所需,另一部分直接被微生物重新利用合成了新的细胞结构^[34]。有机污染物在上述2种作用下^[35-36],物质结构发生了彻底的改变^[37-38],可被有效去除,因此农用酵素具有去除污水中污染物的效果。

乳酸菌作为农用酵素中主要的微生物之一,具有降解环境中亚硝酸盐的能力,其发酵产生的乳酸可促进纤维素和木质素等有机物腐烂分解。肖仔君等^[39]从农用酵素中分离纯化出12株具有抗菌性能的乳酸菌,发现其对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和大肠杆菌(*Escherichia coli*)等肠道致病菌有不同程度的抑制,且对金黄色葡萄球菌的抑菌效果更好。李卓佳等^[40]的研究表明:乳酸杆菌(*Lactobacillus* spp.)能够显著降低水产养殖废水和饲料中的亚硝酸、硝酸和磷酸。

酵母菌作为农用酵素的另一大主要微生物,在20世纪80年代就已经在处理食品加工废水和啤酒生产废水中展现出优势。于洪梅^[41]以 m (啤酒酵母): m (稻壳)=1:10将二者混合,并添加40目稻壳粉作为助滤剂处理含镉废水,经过二次过滤后镉平均回收率高达96.80%。郑少奎等^[42]利用5种酵母菌处理高油污废水,油污和COD的去除率分别达到98%和94%以上。

2.3.3 酶

农用酵素中含有淀粉酶、脂肪酶、过氧化氢酶和蛋白酶等多种水解酶,在降解污水中有机物方面具有一定的潜力。Selvakumar等^[43-44]的研究显示农用酵素发酵后会产生蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶,并将其用于城市垃圾活性污泥的预处理中,以 m (石榴皮): m (菠萝皮): m (橘子皮)=35:35:20为原料制备的酵素,在超声预处理15 min、pH 6、33℃、210转/min搅拌的条件下发酵4 d,该酵素中的脂肪酶

最大活性为57.43 U/mL。卜俊芝^[45]利用果皮等厨余垃圾为原料制成酵素,测定了酵素中蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的活性,结果显示脂肪酶活性最强,可去除63%的油脂。除此之外,农用酵素中还含有超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase)和纤维素酶^[46-48],因此农用酵素还具有清除超氧阴离子自由基、羟基自由基等自由基的能力,可以作为清洁剂使用。

酶类进行催化反应时,会增加生化反应的速率^[49-50],使添加到污水中的有益微生物菌群快速生长繁殖,从而增加水环境内微生物的净水能力。Arun等^[51]研究农用酵素中水解酶的活性发现,农用酵素具有抑菌活性,并在污水处理过程中可以提高污泥的稳定性。Li等^[52]发现微生物产生的淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶等水解酶类在环境保护方面起到了很大的作用。

2.3.4 其他组分

农用酵素中还含有丰富的矿质元素和少量的植物激素^[15]。已有研究显示,农用酵素中含量最多的矿质元素就是氮磷钾这三大植物生长必需的营养元素,同时也含有少量作物生长发育过程中的必需的其他矿质元素,如硫、钙、镁、锰、铁、铜、硼等,这些有益的矿质元素比例适宜,非常利于植物的吸收和利用^[53]。此外,农用酵素中还含有少量的植物激素,如细胞分裂素、生长素、脱落酸和赤霉素等^[15]。矿质元素和植物激素使农用酵素可以有效促进作物的生长,其绿色环保的特性为农用酵素处理污水并用于农田灌溉奠定了基础。

此外,农用酵素还具有提高污泥沉降性能的作用^[54]。农用酵素不仅可以促进微生物生长,还能优化污水中微生物的群落结构,有益菌群占据优势地位可以有效提高污泥的沉降性能,并延长污泥的消化时间^[54-56]。

2.4 农用酵素处理污水应用实例

目前许多研究表明,酵素在去除污水中有机污染物、无机盐离子、降低化学需氧量(COD)和生物需氧量(BOD_5)等方面有较为明显的效果,但酵素去除重金属离子的效果不显著^[57-64]。因此,在面对不同类型的水体时,要适时改换不同的工艺流程,以期达到最优的处理效果。

2.4.1 农用酵素处理垃圾渗滤液

被倾倒在垃圾填埋场的固体废弃物由于各种理化因素相互作用、垃圾的高含水量、雨水渗透以及水与固体废弃物的接触,形成了包含氨、有机物、无机物、生物有机体和重金属等污染物的垃圾渗滤液。Aishwarya等^[57]将农用酵素用于垃圾渗滤液的处理,以 $m(\text{红糖}):m(\text{橙子皮和柠檬皮}):m(\text{水})=1:3:10$ 混合制备农用酵素,在28℃的恒温下发酵3个月,期间用含有1% ($w:V$) NaOH的水置换组件吸收发酵过程中生成的 CO_2 ,过滤并以3 000转/min离心30 min纯化酵素。在5%、10%、15%和20% ($w:V$)的添加比例下,将农用酵素分别与Bhalswa、Ghazipur、Okhla三个城市的垃圾渗滤液混合28 d,然后进行渗滤液污染指数(LPI)估计。LPI表示渗滤液的总体污染潜力,是一个不断增长的规模指数,数值越高,表示环境条件越差。LPI是基于18种参数的复合浓度计算而来,包括 BOD_5 、COD、pH、总凯氏氮、氨氮、大肠菌群总数、酚类化合物、总溶解固体、氯化物、氰化物、铁、铜、镍、锌、铬、汞、铅、砷。Bhalswa、Ghazipur和Okhla的渗滤液初始COD分别为5 216.5、7 692.7、5 927.4 mg/L,经过28 d处理后,垃圾渗滤液中 BOD_5 、COD、总溶解固体、总凯氏氮、氨氮和氯化物显著降低,但重金属含量基本没有变化,Bhalswa和Ghazipur垃圾填埋场渗滤液混合5% ($w:V$)的农用酵素混合最终LPI分别降低了55.12%和60.61%,COD均降到1 000 mg/L以下,在混合比例为20%农用酵素的Okhla垃圾渗滤液的最终LPI降低了74.75%,COD降到394.24 mg/L。

2.4.2 农用酵素处理灰水

生活污水处理是水资源循环利用的重要环节,灰水是指在生活污水中除粪污以外的,来自于家庭的洗衣、厨房、盥洗和沐浴等污水,灰水中的氮磷钾分别占生活污水中氮磷钾的3%、10%和34%,以及41%的COD^[7]。Nazim等^[58]以 $m(\text{红糖}):m(\text{果蔬皮}):m(\text{水})=1:3:10$ 混合制备农用酵素,用5%、10%、20%和50%农用酵素处理灰水,并检测处理后样品的pH、 BOD_5 、COD、氨氮、总溶解固体和磷酸盐等参数,结果显示,用发酵3个月的酵素处理COD为48 200 mg/L的污水只用了30 d就使其达

到马来西亚灌溉用水标准,60 d后COD下降到186 mg/L,而发酵完成后又密封存放2个月的酵素只用了5 d就使灰水达到了灌溉用水标准。

2.4.3 农用酵素及改性麦饭石复合处理黑臭水体

黑臭水体的成因有多个方面:一是有机污染负荷过大,二是放线菌大量繁殖,三是重金属铁锰的污染。单独使用酵素无法改善黑臭水体的水质,需要额外添加处理重金属的物质,许海^[59]以 $m(\text{壳聚糖}):m(\text{麦饭石}):m(\text{植酸})=0.06:1.00:0.03$ 制备了改性麦饭石,由于植酸对很多二价金属离子有极强的络合能力,可以生成沉淀,而将植酸分子通过氢键的作用以壳聚糖分子为中间体连接在麦饭石上,提高了其对于污水中重金属离子的吸附能力,从而填补酵素在去除重金属离子能力方面的空缺。该研究利用改性麦饭石和复合酵素改良黑臭水体,结果显示酵素对氨氮、硫离子、COD、 BOD_5 和铁、锰等重金属均有较高的去除率;且酵素浓度越大,氨氮、硫离子、COD和 BOD_5 去除率越高,且在酵素浓度5.5 mg/L时各指标降幅最大,降幅分别为65.3%、95.5%、84.7%、84.8%,但对重金属的去除效率不高。添加0.4 mg/L的改性麦饭石后,黑臭水体中重金属铁和锰的去除率分别达到了63.8%和66.2%^[59]。

2.4.4 农用酵素处理其他废水

Sambaraju等^[60]利用农用酵素处理乳品废水,可有效减少固体悬浮物。Liao等^[61]用农用酵素处理棕榈油厂废水,其中添加15%的农用酵素对油脂的去除率高达90%。Irfan等^[62]利用餐厨垃圾制作的农用酵素,作为二次出水反硝化碳源的总脱氮效率,与醋酸钠的效率并无显著差异。林青雯等^[63]发现农用酵素可以有效降解偶氮类染料。荆秀艳等^[64]提出想要更大地发挥农用酵素处理污水的潜力,需要降低酵素本身的COD。

2.5 农用酵素处理污水的生态效益

由于我国社会经济的快速发展以及农村现代化建设进程加快,农村的人居环境也面临着诸多问题,其中最为突出的就是农村生活污水污染问题,大部分乡村缺少污水处理厂,乡村居民产生的生活污水都会直接排放,造成了河流和地下水的污染^[65-67],同时面对当前因水资源短缺对农业生产造

成的巨大影响,对生活污水等资源回归农田的可持续生产模式的需求日益迫切。从农业可持续发展的角度出发,构建生活污水等资源还田的模式,是促进农田生态系统物质循环的新思路。

在传统模式中,将灰水与其他污水混合处理^[68-69],传统模式的高污染、高能耗、不可持续与“碳达峰、碳中和”要求的生态循环、可持续发展的矛盾愈发尖锐。农用酵素作为农业常用的添加剂,是一种以动物、植物、菌类等有机废弃物为底物,以乳酸菌为优势菌群,通过微生物厌氧发酵而形成的以有益微生物、天然植物激素、营养元素和有机酸等活性代谢成分为一体的生态产品。农用酵素具有治理污泥污水、降低重金属污染和降解农残的作用。农用酵素因原料来源广泛、成本低、易操作,且能消纳农田废弃物等优势,目前已在很多领域中得到了广泛的应用,具有广阔的前景^[15]。Nazim等^[58]和Rasit等^[70]发现农用酵素对于污水中的COD和油脂等污染物有明显的去除效果。Arun等^[71]的研究表明添加农用酵素可提升乳业废弃活性污泥的产氢能力。周泽宇等^[72]的研究发现用农用酵素喷施稻米可以显著降低稻米中总镉的含量。韦文芳等^[73]的研究发现用农用植物酵素喷施作物对农药有显著的降解效果。

从综合成本、环境效益、农艺价值等多个方面考虑,将农用酵素处理污水和农田灌溉相结合,是对资源的合理配置,可以实现生态环境的改善和恢复。

3 结 论

农用酵素具有成本低、原料易得、富含有机酸和矿物元素、有益微生物及其代谢产物等特点,能够促进农田废弃物资源循环,保证农田生态系统健康发展,降解转化生活污水中的有机废弃物,使污水能够循环利用,缓解农田用水需求量大的压力。本研究以农用酵素处理污水相关研究的文献为基础,通过VOSviewer可视化软件绘制关键词共现网络图,以图中显示的热点研究出发,从农用酵素发酵工艺、酵素中的有效组分、酵素处理污水应用实例、生态效益等几个方面系统阐述了农用酵素处理污水的研究进展,并分析了出水用于灌溉农田的可行性。农用酵素通常以 $m(\text{红糖}):m(\text{原料}):m(\text{水})=$

1:3:10的比例密封发酵3个月制成,用于制作酵素的原料包括新鲜果蔬、果蔬皮、厨余鲜垃圾等,且目前已有不加水不加糖酵素的制作方法。农用酵素的制作可以消纳厨余鲜垃圾和农田中的残次果蔬,减少其对环境的污染。农用酵素中富含有益微生物和多种有机酸、水解酶,通过酸菌协同作用^[74],可降低污水的COD、BOD₅等指标,有效减少污水中的有机污染物含量,且乡村生活污水中基本不存在重金属离子,Nazim等^[58]的研究表明,农用酵素处理生活污水完全可以达到农田灌溉的标准,为农用酵素处理污水后的出水代替部分地下水灌溉农田奠定了基础。但目前,农用酵素处理污水仅停留在试验阶段,并未正式大规模地投入使用,其原因有以下几个方面:

1)农用酵素发酵均质化难。虽然工信部已对农用酵素建立了行业标准,但由于其原料来源广泛,在发酵时间、温度和原料等各种因素的影响下稳定性较差,Gao等^[23]研究表明,使用不同原料发酵的农用酵素代谢产物有细微的差异,造成农用酵素发酵难以均质化。

2)工业污水中重金属难以去除。虽然有研究表明酵素中的酵母菌对重金属镉有较为明显的去除效果^[72],但单一酵素的使用对其他重金属的去除效果微乎其微,需要额外添加可以除去铁、锰等金属离子的物质,这就导致了污水处理成本的升高和操作的不便,使得农用酵素处理污水的普适性变差。

3)缺乏对作用机理的研究。目前,对于农用酵素本身发酵和作用机理的研究还很少,但可以确定的是农用酵素中的有益微生物、有机酸和水解酶等对于去除污水中污染物起到了关键的作用,但具体的作用机理和反应历程仍不明晰。

4)酵素处理污水的工艺流程和标准不统一。目前,关于农用酵素处理污水的研究中发酵原料、作用时间、温度、流程等均不统一。

4 展 望

目前,农用酵素应用于污水处理的研究刚刚起步,相关的研究亟待展开,未来应该从以下几个方面入手:

1) 农用酵素发酵时间较长, 可以通过优化农用酵素发酵时间、发酵温度、原料类型等参数来缩短发酵时间。为促进当地废弃物资源化和发挥本地菌种的优势, 需要因地制宜, 由高校或科研院所协助地方建立标准, 利用当地的农田废弃资源发酵制成酵素, 建立一套标准化的本地酵素生产和应用的工艺后, 再投入使用。

2) 目前, 酵素处理污水的时间相对较长。通过优化农用酵素添加量、改变处理温度、曝气量、辅料等条件, 探究如何缩短酵素处理污水的时间。为了评估酵素处理污水的效果, 以及确定其是否可用于灌溉农田和是否对作物生长有益, 还需要制定一套新的标准, 不简单的以 COD、BOD₅ 等指标评价出水是否达标, 而是以对植物生长有益的乳酸、乙酸和有危害的苯、氰化物等为指标评价酵素处理污水的效果。

3) 未来可以研发配合酵素使用的高效低成本去除重金属的物质, 提高农用酵素处理含重金属离子污水的效率。

4) 关于农用酵素在去除污水中污染物发挥作用的机理研究还不完善, 未来可以对农用酵素处理污水的过程进行动态监测, 测定各个时期微生物的群落结构、水体内水解酶和有机酸等代谢产物含量的动态变化, 根据各项数据确定农用酵素在污水处理过程中的作用机理。

5) 近年来, 关于农用酵素处理污水的研究越来越多, 但始终没有投入到实际的生产中。未来可以将这项技术和农村厕所革命相结合, 在乡村靠近农田的地方建立污水处理厂, 利用周边农田的废弃物量产农用酵素, 将全村人的生活污水集中起来用农用酵素处理达到可以还田的标准, 供灌溉使用。

参考文献 References

- [1] Zhang B, Chen Z M, Zeng L, Qiao H, Chen B. Demand-driven water withdrawals by Chinese industry: A multi-regional input-output analysis [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(1): 13-28
- [2] 中华人民共和国水利部. 2022年中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Water Resources Bulletin 2022* [M] Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2023 (in Chinese)
- [3] Damania R. The economics of water scarcity and variability [J]. *Oxford Review of Economic Policy*, 2020, 36(1): 24-44
- [4] 王盈盈. 分散型村庄污水收集及处理模式探讨[J]. 农村实用技术, 2021(1): 167-168
Wang Y Y. Discussion on sewage collection and treatment mode in decentralized villages [J]. *Rural Practical Technology*, 2021 (1): 167-168 (in Chinese)
- [5] 孔令为, 邵卫伟, 叶红玉, 梅荣武, 廖敏, 郑展望, 王晓敏, 徐志荣. 农村生活污水治理技术应用的浙江经验及发展方向[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 12-17
Kong L W, Shao W W, Ye H Y, Mei R W, Liao M, Zheng Q W, Wang X M, Xu Z R. Experience and development direction of application of rural domestic wastewater treatment technology in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(2): 12-17 (in Chinese)
- [6] 王倩. 我国南北方农村生活污水的特点及处理工艺介绍[J]. 浙江化工, 2020, 51(10): 47-50
Wang Q. Introduction of the characteristics and treatment process of rural domestic sewage in South and North China [J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2020, 51(10): 47-50 (in Chinese)
- [7] 李子富, 王晓希, 王婷婷, 范晓琳, 尹福斌. 城市生态卫生排水系统及其应用[J]. 建设科技, 2010(21): 44-47
Li Z F, Wang X X, Wang T T, Fan X L, Yin F B. Urban ecological sanitation drainage system and its applications [J]. *Construction Science and Technology*, 2010(21): 44-47 (in Chinese)
- [8] Liu Y, Huang J k, Zikhali P. Use of Human excreta as manure in rural China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(2): 434-442
- [9] Nkoa R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 473-492
- [10] Pan W L, Ouyang H L, Tan X Q, Deng R, Gu L, He Q. Anaerobic dynamic membrane bioreactors for synthetic blackwater treatment under room temperature and mesophilic conditions [J/OL]. *Bioresource Technology*, (2022-05-09). DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127295
- [11] Gao M J, Zhang L, Guo B, Zhang Y D, Liu Y. Enhancing biomethane recovery from source-diverted blackwater through hydrogenotrophic methanogenesis dominant pathway [J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, (2019-06-16). DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2019.122258
- [12] Manga M, Camargo-Valero M A, Anthonj C, Evans B E. Fate of faecal pathogen indicators during faecal sludge composting with different bulking agents in tropical climate [J/OL]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, (2020-12-09). DOI: doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113670
- [13] Iwamoto R, Yamaguchi K, Arakawa C, Ando H, Haramoto E, Setsukinai K I, Katayama K, Yamagishi T, Sorano S, Murakami M, Kyuwa S, Kobayashi H, Okabe S, Imoto S, Kitajima M. The detectability and removal efficiency of SARS-CoV-2 in a large-scale septic tank of a COVID-19 quarantine facility in Japan [J/OL]. *Science of The Total Environment*, (2022-08-06). DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157869
- [14] Gao Y, Li H Y, Yang B, Wei X C, Zhang C X, Xu Y, Zheng X Q. The preliminary evaluation of differential characteristics and factor evaluation of the microbial structure of rural household toilet excrement in China

- [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(32): 43842-43852
- [15] 张越, 赵宇宾, 蔡亚凡, 刘小平, 胡跃高, 王小芬. 农用植物酵素的生态效应研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 25-35
- Zhang Y, Zhao Y B, Cai Y F, Liu X P, Hu Y G, Wang X F. Ecological effects of plant Jiaosu for agriculture: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 25-35 (in Chinese)
- [16] QB/T 5323—2018. 工业和信息化部 植物酵素[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- QB/T 5323—2018. Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China: Plant Jiaosu[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018 (in Chinese)
- [17] QB/T 5324—2018. 工业和信息化部 酵素产品分类导则[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018
- QB/T 5324—2018. Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China: Classification guidelines for enzyme products [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018 (in Chinese)
- [18] 李仲树, 李冠嘉, 李冠华, 周丽娟. 五行酵素液及其制备方法. 福建, CN101904504A[P]. 2010-12-08
- Li Z S, Li G J, Li G H, Zhou L J. Five element Jiaosu solution and its preparation method. Fujian, CN101904504A[P]. 2010-12-08 (in Chinese)
- [19] 方晟, 周紫琳, 郑凤丽, 王珍珍, 毛建卫, 单之初. 黄酒米浆水制备农用酵素营养液发酵过程中营养成分的变化[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(6): 1004-1011
- Fang S, Zhou Z L, Zheng F L, Wang Z Z, Mao J W, Shan Z C. Changes in nutrition components of agricultural Jiaosu nutrient solutions produced from rice milk during fermentation process [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(6): 1004-1011 (in Chinese)
- [20] 杨小幸, 周家春, 陈启明, 秦臻, 马明月, 赵黎明. 苹果酵素天然发酵过程中代谢产物的变化规律[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 15-19
- Yang X X, Zhou J C, Chen Q M, Qin Z, Ma M Y, Zhao L M. Changes in metabolites products during natural fermentation of apple into enzyme drink[J]. *Food Science*, 2017, 38(24): 15-19 (in Chinese)
- [21] 黄丽真. 餐厨垃圾减量化处置与利用探讨[J]. 海峡科学, 2019(6): 39-40
- Huang L Z. Discussion on reducing disposal and utilization of kitchen waste[J]. *Straits Science*, 2019(6): 39-40 (in Chinese)
- [22] 周新萍, 付小全, 陈桂兰. 利用餐厨垃圾制作植物酵素及其活性成分分析[J]. 东莞理工学院学报, 2014, 21(5): 93-96
- Zhou X P, Fu X Q, Chen G L. The manufacture of plant enzyme by restaurant garbage and analysis of its active components[J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2014, 21(5): 93-96 (in Chinese)
- [23] Gao Y H, Zheng Z H, Cheng X Q, Zhang Y, Liu X P, Hu Y G, Cai Y F, Wang X F. An innovative way to treat cash crop wastes: The fermentation characteristics and functional microbial community using different substrates to produce Agricultural Jiaosu[J/OL]. *Environmental Research*, (2023-03-21). DOI:doi.org/10.1016/j.envres.2023.115727
- [24] Soufleros E H, Bouloumpasi E, Tsarchopoulos C, Biliaderis C G. Primary amino acid profiles of Greek white wines and their use in classification according to variety, origin and vintage [J]. *Food Chemistry*, 2003, 80(2): 261-273
- [25] Arun C, Sivashanmugam P. Identification and optimization of parameters for the semi-continuous production of garbage enzyme from pre-consumer organic waste by green RP-HPLC method [J]. *Waste Management*, 2015, 44: 28-33
- [26] 靳素媛, 耿燕, 周琦, 吕琪琪, 曹刚刚, 贾友彬, 李宣衡, 史劲松. 24种食用植物酵素功能成分分析与生物活性初步研究[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 62-67
- Jin S Y, Geng Y, Zhou Q, Lv Q Q, Cao G G, Jia Y B, Li X H, Shi J S. Analysis of functional components of 24 fermented juice of edible plant and preliminary study on their biological activities [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(8): 62-67 (in Chinese)
- [27] 董延江, 陈稼, 杨小萍, 韩业东, 吴倩. 发酵中草药(本草酵素)的体外抑菌试验评估[J]. 现代畜牧兽医, 2020(11): 6-8
- Dong Y J, Chen J, Yang X P, Han Y D, Wu Q. Evaluation of antibacterial test of fermented Chinese herbal preparations (Bencaojiaosu) in vitro [J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2020(11): 6-8 (in Chinese)
- [28] 王辉, 马秀敏, 张鹰. 青梅酵素的生物活性及体外抑菌作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 39-43
- Wang H, Ma X M, Zhang Y. Bioactivity and inhibiton effects of greengage ferment[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(12): 39-43 (in Chinese)
- [29] 胡小兵, 汪坤, 沈翼军, 张琳, 姚友长, 林睿, 顾娴静. 果壳种类对生物膜特性及废水处理效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2887-2894
- Hu X B, Wang K, Shen Y J, Zhang L, Yao Y C, Lin R, Gu X J. Influence of types of plant husk carriers on biofilm characteristics and wastewater treatment efficiency [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2887-2894 (in Chinese)
- [30] 佟玉洁. 自制环保酵素改善土壤肥力试验研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 119-121
- Tong Y J. Test research of soil fertility improved by self-made garbage enzyme[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(26): 119-121 (in Chinese)
- [31] 任秀秀, 余冬丽, 郭涛, 郭正江, Luo Liu. 餐余酵素中益生菌的分离培养及鉴定[J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2021, 39(3): 61-67
- Ren X X, Yu D L, Guo T, Guo Z J, Luo L. The separation cultivation and detection of probiotics with microbial agent yixilin [J]. *Journal of Guizhou University of Engineering Science*, 2021, 39(3): 61-67 (in Chinese)
- [32] 凌空, 周明, 陆路, 崔欣悦, 马勇, 王憬, 鲁军, 谷瑞增. 果蔬酵素不同发酵周期中微生物的分离鉴定[J]. 中国食品添加剂, 2018(7): 71-77
- Ling K, Zhou M, Lu L, Cui X Y, Ma Y, Wang J, Lu J, Gu R Z. Isolation and identification of predominant microbes from fruit and vegetable enzyme during different fermentation process[J]. *China Food Additives*, 2018(7): 71-77 (in Chinese)
- [33] 杜丽平, 刘艳, 焦媛媛, 马立娟, 肖冬光, 管于平. PCR-DGGE分析木瓜酵素自然发酵过程中微生物的多样性[J]. 现代食品科技, 2017, 33(8): 80-87, 109
- Du L P, Liu Y, Jiao Y Y, Ma L J, Xiao D G, Guan Y P. Polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis analysis of microbial diversity of Papaya enzyme preparation during natural fermentation [J].

- Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(8): 80-87, 109 (in Chinese)
- [34] 孟睿, 何连生, 胡春明, 王宏亮, 张丹荣, 王宫廷. 复合酵素净化城镇污水的机理研究[J]. 环境生态学, 2019, 1(2): 77-79, 84
- Meng R, He L S, Hu C M, Wang H L, Zhang D R, Wang G T. Mechanism study on purifying urban sewage by compound enzyme [J]. *Research Academy of Environmental Sciences*, 2019, 1(2): 77-79, 84 (in Chinese)
- [35] 张梦竹, 于磊, 王睿, 李元志. Orbal氧化沟工艺污水厂中关键酶活性对污水处理效率的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2142-2151
- Zhang M Z, Yu L, Wang R, Li Y Z. Effect of key enzyme activities on the operating efficiency in wastewater treatment plant with Orbal oxidation ditch [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(9): 2142-2151 (in Chinese)
- [36] 曹嘉琪, 张英奎, 徐晓萌, 房柏莹. 基于DEA和SBM-Undesirable模型的山东省污水处理效率研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1764-1770
- Cao J Q, Zhang Y K, Xu X M, Fang B Y. Efficiency of sewage treatment in Shandong Province based on DEA and SBM-undesirable model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(7): 1764-1770 (in Chinese)
- [37] 黄秋婷, 薛天福, 杨梅, 金朝辉. 几种低温微生物菌株及其组合对北方农村生活污水处理效果[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 50-57
- Huang Q T, Xue T F, Yang M, Jin Z H. Effects of several psychrotroph strains and their combinations on the treatment of rural sewage in Northern China [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition*, 2020, 47(3): 50-57 (in Chinese)
- [38] 郑俊, 王梦琳, 张德伟, 余沛, 赵梦柯, 张明睿. 无泡充氧膜生物反应器对生活污水处理效果的研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 55-61
- Zheng J, Wang M L, Zhang D W, Yu P, Zhao M K, Zhang M R. A Effect of non-bubble aerated membrane bioreactor on domestic wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(13): 55-61 (in Chinese)
- [39] 肖仔君, 钟瑞敏, 陆伟东, 康宇婷, 林丽芳. 酵素源乳酸菌的益生功能及抑菌特性评价[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 62-68
- Xiao Z J, Zhong R M, Lu W D, Kang Y T, Lin L F. Evaluation of probiotic and antibacterial properties of lactic acid bacteria derived from fermented fruit broth [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(8): 62-68 (in Chinese)
- [40] 李卓佳, 周海平, 杨莺莺, 洪敏娜, 梁晓华. 乳酸杆菌(*Lactobacillus* spp) LH对水产养殖污染物的降解研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 342-349
- Li Z J, Zhou H P, Yang Y Y, Hong M N, Liang X H. The degradation of aquaculture contaminants by LH (*Lactobacillus* spp) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 342-349 (in Chinese)
- [41] 于洪梅. 低双乙酰低高级醇啤酒酵母菌种的选育及其废酵母的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022
- Yu H M. Study on selection and breeding of low diacetyl and low higher alcohols strain of beer yeast and the application of waste yeast [D]. Changchun: Jilin University, 2022 (in Chinese)
- [42] 郑少奎, 杨敏, 刘芳. 利用酵母菌处理色拉油加工废水连续小试初探[J]. 中国环境科学, 2001, 21(4): 347-350
- Zheng S K, Yang M, Liu F. Preliminary Primary studies on laboratory-scale continuous treatment salad oil manufacturing wastewater by yeasts [J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(4): 347-350 (in Chinese)
- [43] Selvakumar P, Sivashanmugam P. Multi-hydrolytic biocatalyst from organic solid waste and its application in municipal waste activated sludge pre-treatment towards energy recovery [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 1-10
- [44] Selvakumar P, Sivashanmugam P. Optimization of lipase production from organic solid waste by anaerobic digestion and its application in biodiesel production [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 165: 1-8
- [45] 卜俊芝. 混合果蔬酵素中生物活性成分及其应用研究[J]. 东莞理工学院学报, 2020, 27(5): 90-94
- Bu J Z. Biological components and application of mixed fruit and vegetable enzyme [J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2020, 27(5): 90-94 (in Chinese)
- [46] 陈爽, 朱忠顺, 高妍妍, 朱显峰. 分光光度法分析水果酵素中功效酶活性的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 218-221
- Chen S, Zhu Z S, Gao Y Y, Zhu X F. Detection of efficacy enzyme activity in ferments of fruits by spectrophotometric method [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 249(8): 218-221 (in Chinese)
- [47] 刘庆松, 叶璇, 孙洪庆, 马越, 白东清. 环保酵素的生物活性及在农业生产中的应用[J]. 南方农业, 2021, 15(32): 232-234
- Liu Q S, Ye X, Sun H Q, Ma Y, Bai D Q. Biological activity of environmental protection enzyme and its application in agricultural production [J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(32): 232-234 (in Chinese)
- [48] 邵颖, 陈安徽, 黄勃, 夏振荣, 王西朴. 植物酵素发酵过程中几种功效酶的动态变化及减肥功效评价[J]. 食品科技, 2018, 43(9): 117-120
- Shao Y, Chen A H, Huang B, Xia Z R, Wang X P. Changes of effective enzymes during the fermentation of plant ferment and weight-loss activity on mice [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(9): 117-120 (in Chinese)
- [49] 周婧, 支苏丽, 宫祥静, 杨凤霞, 谷艳茹, 丁飞飞, 张克强. 三类抗生素在两种典型猪场废水处理工艺中的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 430-438
- Zhou J, Zhi S L, Gong X J, Yang F X, Gu Y R, Ding F F, Zhang K Q. The removal effect of three classes of antibiotics in two typical swine wastewater treatment systems [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 430-438 (in Chinese)
- [50] 纪丁愈, 李云祯, 邹渝. 铁尾矿制备聚合硫酸铁实验及造纸污水处理效果初步评价[J]. 无机盐工业, 2021, 53(8): 96-100
- Ji D Y, Li Y Z, Zou Y. Experimental study on the preparation of polymeric ferric sulfate from iron tailings and preliminary evaluation of the treatment effect of papermaking wastewater treatment [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2021, 53(8): 96-100 (in Chinese)
- [51] Arun C, Sivashanmugam P. Investigation of biocatalytic potential of garbage enzyme and its influence on stabilization of industrial waste activated sludge [J]. *Process safety and Environmental Protection*, 2015, 94: 471-478
- [52] Li S, Yang X F, Yang S, Zhu M Z, Wang X N. Technology prospecting

- on enzymes: Application, marketing and engineering [J/OL]. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, (2012-09-03). DOI:doi.org/10.5936/esbj.201209017
- [53] 代明亮, 李松涛, 韩振海, 许雪峰, 张新忠, 李天忠. 植物源营养液对‘雪青梨’生长及果实品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(5): 19-23
- Dai M L, Li S T, Han Z H, Xu X F, Zhang X Z, Li T Z. Effects of plant derived nutrient solutions on the growth and fruit quality of ‘Xueqing’ pear [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(5): 19-23 (in Chinese)
- [54] 胡雪筠, 龙云川, 蒋娟, 朱成斌, 胡菁, 周少奇. 环保酵素对生活污水的处理效果初探[J]. 贵州科学, 2021, 39(6): 52-57
- Hu X J, Long Y C, Jiang J, Zhu C B, Hu J, Zhou S Q. Preliminary study on the treatment effect of domestic sewage by garbage enzyme [J]. *Guizhou Science*, 2021, 39(6): 52-57 (in Chinese)
- [55] 孙进才, 陈自建, 陈宏平. 大麻脱胶废水处理工程提质改造及效果研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(12): 136-140
- Sun J C, Chen Z J, Chen H P. Upgrading reconstruction and treatment effect of hemp degumming wastewater treatment facility [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(12): 136-140 (in Chinese)
- [56] 徐寸发, 闻学政, 张迎颖, 刘海琴, 宋伟, 王岩, 秦红杰, 张志勇. 漂浮植物组合生态处理污水处理厂尾水的效果及植物生理响应[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1335-1340
- Xu C F, Wen X Z, Zhang Y Y, Liu H Q, Song W, Wang Y, Qin H J, Zhang Z Y. The ecological treatment effect of tail water from sewage treatment plant by combination with floating macrophytes and their physiological response [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, 41(11): 1335-1340 (in Chinese)
- [57] Rani A, Negi S, Hussain A, Kumar S. Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme [J/OL]. *Bioresource Technology*, (2019-11-18). DOI:doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122437.
- [58] Nazim F. Treatment of synthetic greywater using 5% and 10% garbage enzyme solution [J]. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2013, 3(4): 111-117
- [59] 许海. 复合酵素和麦饭石在黑臭水体处理中的应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(4): 17-19
- Xu H. Application of compound enzyme and maifan stone in treatment of dark and odorous water body [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(4): 17-19 (in Chinese)
- [60] Sambaraju S, Sree Lakshmi V. Eco-friendly treatment of dairy wastewater using garbage enzyme [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 650-653
- [61] Liao J B, Chen Q, Pan N X, Yu X Y, Gao X, Shen J N, Gao C J. Amphoteric blend ion-exchange membranes for separating monovalent and bivalent anions in electrodialysis [J]. *Separation and Purification Technology*, (2020-03-10). DOI:doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116793
- [62] Irfan M, Ge L, Wang Y M, Yang Z J, Xu T W. Hydrophobic side chains impart anion exchange membranes with high monovalent-divalent anion selectivity in electrodialysis [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(4): 4429-4442
- [63] 林青雯, 詹慧婕. 环保酵素对偶氮类染料桔黄II的降解过程初探[J]. 广州化工, 2019, 47(23): 61-64
- Lin Q W, Zhan H J. Study on degradation of azo dyes OR II by environment-friendly enzymes [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(23): 61-64 (in Chinese)
- [64] 荆秀艳, 李吉祥, 王娜, 杨红斌. 环保酵素处理生活废水可行性探讨[J]. 水处理技术, 2019, 45(1): 98-101
- Jing X Y, Li J X, Wang N, Yang H B. Feasibility study on Garbage enzyme for domestic wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(1): 98-101 (in Chinese)
- [65] Lu Y L, Song S, Wang R S, Liu Z Y, Meng J, Sweetman A J, Jenkins A, Ferrier R C, Li H, Luo W, Wang T. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China [J]. *Environment International*, 2015, 77: 5-15
- [66] Gossner M M, Lewinsohn T M, Kahl T, Grassein F, Boch S, Prati D, Birkhofer K, Renner S C, Sikorski J, Wubet T, Arndt H, Baumgartner V, Blaser S, Blüthgen N, Börschig C, Buscot F, Diekötter T, Jorge L R, Jung K, Keyel A M, Klein A, Klemmer S, Krauss J, Lange M, Müller J, Overmann J, Pašalić E, Penone C, Perović D J, Purschke O, Schall P, Socher S A, Sonnemann I, Tschapka M, Tscharnkte T, Türke M, Venter P C, Weiner C N, Werner M, Wolters V, Wurst S, Westphal C, Fischer M, Weisser W W, Allan E. Land-use intensification causes multitrophic homogenization of grassland communities [J]. *Nature*, 2016, 540(7632): 266-269
- [67] 唐静, 马云, 赵丽青, 李明哲, 李正义, 贾俊涛, 姜英辉, 王昌军. 浅析生物有机肥中功能微生物对食品质量安全的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(11): 4091-4097
- Tang J, Ma Y, Zhao L Q, Li M Z, Li Z Y, Jia J T, Jiang Y H, Wang C J. Analysis on the effect of functional microbes in bio-organic fertilizer on food quality and safety [J]. *Journal of Food Safety & Quality Testing*, 2017, 8(11): 4091-4097 (in Chinese)
- [68] van Voorthuizen E, Zwijnenburg A, van der Meer W, Temmink H. Biological black water treatment combined with membrane separation [J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4334-4340
- [69] Paulo P L, Azevedo C, Begosso L, Galbiati A F, Boncz M A. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 50: 95-100
- [70] Rasit N, Chee Kuan O. Investigation on the Influence of bio-catalytic enzyme produced from fruit and vegetable waste on palm oil mill effluent [J]. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2018, 140(1): 12-15
- [71] Arun C, Sivashanmugam P. Enhanced production of biohydrogen from dairy waste activated sludge pre-treated using multi hydrolytic garbage enzyme complex and ultrasound-optimization [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 164: 277-287
- [72] 周泽宇, 唐文邦, 明兴权, 张力科, 张桂莲, 雷斌, 彭赛, 邓化冰, 易国良. 喷施植物酵素“金禾苗”与“环保酵素”对水稻产量及稻米中镉含量的影响[J]. 中国农技推广, 2016, 32(6): 50-52
- Zhou Z Y, Tang W B, Ming X Q, Zhang L K, Zhang G L, Lei B, Peng S, Deng H B, Yi G L. Effects of spraying plant enzymes “jinhe Miao” and “environmental enzyme” on rice yield and cadmium content in rice [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2016, 32(6): 50-52 (in

Chinese)

- [73] 韦文芳, 梁春红, 唐千淄, 吴雪莲. 环保酵素对田间种植蔬菜残留农药的降解作用[J]. 广西农学报, 2016, 32(3): 24-26

Wei W F, Liang C H, Tang Q Z, Wu X L. Study on degradation of the pesticide residues in vegetables by spraying Garbage enzyme[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2016, 32(3): 24-26 (in Chinese)

- [74] Zhang Y, Gao Y H, Zheng Z H, Meng X Y, Cai Y F, Liu J B, Hu Y G, Yan S D, Wang X F. A microbial ecosystem: Agricultural Jiaosu achieves effective and lasting antifungal activity against *Botrytis cinerea* [J/OL]. *AMB Express*, (2020-12-14). DOI:doi.org/10.1186/s13568-020-01156-7

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 徐润钰, 中国农业大学农学院作物栽培学与耕作学硕士研究生, 参与国家“十四五”重点研发计划(2021YFD1901103-1)。



通讯作者简介: 王小芬, 博士, 中国农业大学农学院教授, 博导, 研究方向为作物秸秆和畜禽粪便资源化, 中国生物发酵协会酵素分会理事。山东高密市、山西怀仁市等地畜禽粪便整县推进首席科学家。参与科技部国家“十三五”重点研发计划(2019YFC0408700)和国家“十四五”重点研发计划(2021YFD1901103-1), 担任子课题项目负责人。曾获中国城市环境卫生协会科学技术奖, 中国城市环境卫生协会科技进步国家一等奖, 全国农业专业学位研究生教育指导委员会实践教学成果奖, 全国农业专业学位研究生教育指导委员会其他国家一等奖, 发表SCI论文40余篇, 参与编写《农业原理》。