

菌糠基吸附剂研究现状与展望

范盛远¹, 王黎明^{1*}, 冯康² (1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江大庆 163319; 2. 北京固废处理有限公司, 北京 100125)

摘要 菌糠不仅具有一般秸秆和木材的微观结构与官能团, 还存在大量微生物和菌丝, 因而对污染物的吸附不仅具有物理、化学双重特性, 还对有机污染的降解有着独特的生物效应。综述不同状态下的菌糠对重金属、有机化学品以及营养元素的吸附和分解的研究进展, 分析各状态菌糠对污染物的去除特性及规律, 探讨菌糠吸附剂利用现状和存在的问题, 并对菌糠作为吸附剂的研究趋势提出展望。

关键词 有机污染; 重金属; 菌糠; 吸附剂

中图分类号 X 705 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)32-0017-03

Present Situation and Prospect of Adsorbent Characteristics of Mushroom slag

FAN Sheng-yuan¹, WANG Li-ming¹, FENG Kang² (1. Heilongjiang Bayi Agricultural University (HLAU), Daqing, Heilongjiang 163319; 2. Beijing Solid Waste Disposal Co., Ltd., Beijing 100125)

Abstract The mushroom substrate not only has the micro structure and functional groups of general straw and wood, but also has a large number of microorganisms and hyphae, and thus the adsorption behavior from pollutants has not only physical and chemical characteristics, but also a unique biological effect on the degradation of organic pollutants. The research progress on the adsorption and decomposition of heavy metals, organic chemicals and nutrient elements in different conditions were reviewed, and the characteristics and rules of fungus chaff on pollutant removal were analyzed. The utilization status and existing problems of the mushroom bran adsorbent were discussed and a research trend of mushroom bran adsorbent was put forward.

Key words Organic pollution; Heavy metal; Fungus chaff; Adsorbent

菌糠(SMS)作为一种农业废弃物, 在国内广泛分布。我国是世界上最大的食用菌生产国, 每年产量达3 000万t左右, 占世界总产量75%以上, 菌糠总量达到13 080万~16 350万t^[1]。除部分被用作动物饲料、作物培养基、二次种菇等^[2], 更多的菌糠被自然废弃或者直接焚烧, 造成环境的污染和大量宝贵资源的浪费。

一些研究表明, 微生物如细菌、真菌、藻类^[3]等对金属有很强的吸附能力, 因此微生物菌体是重金属生物吸附剂的首选材料, 细菌及其代谢产物对溶解态的金属离子有很强的络合能力, 这主要归因于其表面的独特化学组成^[4]。活性生物体及非活性生物体均具有较强的生物吸附性能, 而且特定情况失去生物活性的生物体对重金属的富集能力并不比活性生物体差, 表明非活性生物体用于重金属等吸附处理具有一定潜在优势^[5]。菌糠的有效利用可以节省大量的木材, 如果菌糠与秸秆相互利用, 不仅可以解决大量的秸秆存积问题, 起到固碳、环保的功能, 还可以生产出大量优质菌糠基吸附剂。该研究将从活性菌糠和热解后菌糠对重金属钝化与吸附、有机污染物降解与吸附及菌糠对土壤营养元素吸附特性等方面进行分析, 以为菌糠基吸附剂的应用提供指导。

1 菌糠基本特性

菌糠是食用菌收获后留下的培养基固体废物, 由锯木屑、玉米芯、甘蔗渣等多种农作物秸秆及其他有机废料混合而成^[1]。食用菌菌糠不仅含有丰富的有机质, 而且还含有多种矿质元素。据测定分析, 其含水量为30%~55%, 粗蛋白含量5.80%~15.44%, 粗纤维含量2.00%~37.11%, 粗脂肪含量0.12%~4.53%, 粗灰分含量1.56%~35.87%, 无氮浸出物33.00%~63.50%, 钙0.21%~4.59%, 全氮、全磷、全钾总养分

含量2.72%~5.39%, C:N一般在30:1以下, pH在6.0~8.0, 大多数菌渣的有机质含量达到45%以上^[6]。

菌糠表面有巨大的比表面积和孔隙率, 并存在多种菌糠酶和菌丝死体^[7], 热解后的菌糠微观结构与木材热解炭相似, 若结合多种可发生沉淀作用的官能团^[8], 可对重金属、难降解农药、残余抗生素等具有一定的吸附和分解能力。

2 菌糠对重金属离子的吸附研究

菌糠在重金属吸附方面的能力不断被发掘, 其表面含有丰富的羟基、氨基、羧基及磷酸基等活性基团, 可以络合废水中的金属离子, 也可以通过菌糠表面多孔结构, 对污染废水进行物理吸附^[9]。菌糠与其他吸附剂混合, 对污染因子中重金属吸附的试验研究也越来越多, 其表现出来的优异性能, 促使多种复合型吸附剂被研究出来。

2.1 单一菌糠对重金属的吸附特性 大多数菌糠自身重金属含量低于国家标准, 张庆玉等^[10]抽样检测了多地金针菇重金属含量, 均未检出Cd²⁺(检出量<0.01 mg/kg), As、Cr的含量很低, 约为控制标准的1%; Pb含量为控制标准的21.8%; Hg含量为控制标准的16.2%, 但霉变菌包的Pb、Zn、Cr、Hg含量略高于未霉变菌包, 其他元素差异不明显; Huang等^[11]对北京多种菌类和对应的菌糠进行重金属检测, 结果显示, Cd、Hg、Pb、Fe、Zn等重金属含量均符合世界粮农组织规定值。说明菌糠本身可以作为符合标准的工、农业原料, 它的合理利用不会对环境带来负面影响, 但霉变的菌糠对重金属的吸附能力有所上升, 其丰富的有机质随着霉变程度会释放出不同程度的促进物质, 说明菌糠经特定处理后吸附能力会有一定增强, 但菌糠的霉变会产生CO、SO₂、苯、甲苯和二甲苯等有害物质, 若大量处理菌糠, 就需要把环境保护作为一个重要因素来考虑。

该研究对相关文献进行阅读、分析, 总结以未改性菌糠为原料的重金属吸附剂, 探索不同吸附条件下菌糠对Cd²⁺、

作者简介 范盛远(1996—), 男, 黑龙江讷河人, 硕士研究生, 研究方向: 生物质能源及装备研究。* 通讯作者, 教授, 硕士生导师, 从事生物质技术与装备教学研究。

收稿日期 2018-07-20

Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr(VI) 、 Cu^{2+} 等重金属的最佳吸附特性。菌糠对各重金属的吸附结果见表1。

表1 菌糠对各种金属吸附性能

Table 1 Adsorption properties of mushroom bran to various metals

重金属类型 Heavy metal type	重金属浓度 Concentration of heavy metal mg/L	溶液 pH pH of solution	菌糠用量 Dosage of fungus chaff//g/L	吸附温度 Adsorbent temperature// $^{\circ}\text{C}$	吸附率 Adsorption rate//%	文献 Reference
Cd^{2+}	100	5	100	25	68.72	[12]
Ni^{2+}	50	5	20	25	63.85	[13]
Zn^{2+}	20	6	12	25	88.96	[14]
Pb^{2+}	20	5	16	25	92.79	[15]
Cr(VI)	10	2	16	30	79.72	[16]
Cu^{2+}	100	5	100	25	78.65	[12]
	75	7	30	25	77.96	[17]
	75	7	31.6	25	80.51	[17]
	50	6	20	25	72.56	[18]
	8	6	10	30	74.46	[19]

由表1可知,未改性菌糠对各种重金属均有一定的吸附能力,尤其对 Pb^{2+} 吸附性能较好;在相同吸附条件下,菌糠施用量越高对 Cu^{2+} 吸附率就越高,且对 Cu^{2+} 的吸附性能高于 Cd^{2+} ,对 Ni^{2+} 的吸附量较小;菌糠对重金属的吸附与环境pH值有很大关联。除上述实验室结果外,邵云等^[20]把菌糠直接利用在Cr浓度为250 mg/kg的污染土壤中,并对小麦生长产生的影响进行研究,结果显示,施用秸秆、生物炭和菌糠均能有效降低小麦籽粒中的Cr含量,但施用菌糠的效果更为明显,说明菌糠适合作为一种生物茎下吸附剂,并对作物籽粒去重金属化有现实性价值。但对于菌糠作为吸附剂的研究,大多数还停留在实验室阶段,要投入实际应用还需进一步开发,此外,菌糠固定重金属的具体机制并不清楚,需要进一步研究和总结各个材料对重金属的吸附^[21]。

2.2 混合型菌糠对重金属的吸附特性 单一吸附剂与混合型吸附剂特性差异的研究,在吸附剂开发过程中的地位不可忽视。Wang等^[22]分别用石灰、煤粉和菌糠研究对土壤中 Cd^{2+} 进行吸附,结果表明游离态 Cd^{2+} 含量从33.7%降低至16.8%~27.8%,但如果在石灰和煤粉中加入少量菌糠,则各吸附剂对游离态 Cd^{2+} 的吸附率可增长30%~37%,且对铁、锰氧化物有一定固持作用,能显著提高土壤的pH,表明菌糠吸附原理与石灰、煤粉吸附原理除与自身孔隙率有关,还与吸附剂本身包含的碱性官能团有很大联系。

2.3 改性菌糠对重金属的吸附特性 Jing等^[23]研究金福菇菌糠表面改性后,对 Cr(VI) 的吸附性能增加了9.4倍。张芝利^[13]对菌糠进行酸改性试验,分别用0.1、0.5 mol/L草酸、硝酸、次氯酸进行酸化处理,结果显示几种酸化改性均能提高菌糠对 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附效率,但0.5 mol/L草酸改性效果最为明显,对 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附率分别达到86.37%和81.94%。说明菌糠改性可能会增大其结构孔隙度、比表面积和表面官能团的数量,激发出含有重金属吸附的官能团,为研制出超越木材基的活性炭提供理论依据。

2.4 菌糠肥对重金属的吸附特性 王腾等^[24]研究菌糠堆肥对盆栽玉米各部位重金属含量变化的影响,结果显示玉米地

下部分的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 含量平均增加11.20%、17.12%, Cr^{2+} 含量平均减少24.13%,地上部分 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 含量减少,叶片 Cr^{2+} 含量增加,说明菌糠肥的施用,可以减少玉米对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{2+} 的吸收,并且有效降低植株地上部分的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 含量,可以将 Cr^{2+} 保存在玉米叶中,减少玉米籽粒中 Cr^{2+} 含量,降低重金属污染籽粒对人、畜的伤害。张丽萍等^[25]研究菌糠与稻壳混合饲养猪场垫料对重金属活性的影响,发现该物料对 Zn^{2+} 吸附率达到81%以上,施用在农田不会对土壤产生较大危害,从减少环境 Zn^{2+} 污染角度可以合理开发。

3 菌糠对有机物污染的去除特性

有机污染物如农药残留、医药残留、石油烃等污染不仅自然降解周期长,还会随着环境变化进一步扩大受污面积^[26],一般性化学试剂去除后还会带来二次污染,若采用有机肥、菌糠等作为吸附剂不仅不会带来二次污染,还会缩短消解周期,提高土壤肥力^[27]。

3.1 菌糠对石油烃的吸附与降解特性 宋雪英等^[28]研究菌糠对柴油污染土壤的治理特性,发现随着菌糠与污染土壤的体积混合比增加,土壤中石油烃含量逐步降低,经过90 d的处理,石油烃的降解率可达73%,由于菌糠具有较好的透气、透水性,本身又携带大量的微生物,可在较短时间内形成有利于石油烃分解的生物群落,较秸秆、木屑、煤灰等吸附剂有不可替代的优势。

3.2 菌糠对残留医药的吸附与降解特性 王佳丽等^[29]研究菌糠在养殖业污染水中对残留磺胺类抗生素的去除特性。结果表明,当4种磺胺类抗生素浓度为5 mg/L时,菌糠吸附率均高于80%,最高吸附率可达93%,吸附特性优于火山渣与骨炭,环境pH、水硬度、离子浓度对菌糠吸附特性也有很大影响,当溶液偏酸性、离子浓度较低时吸附效率较大,此时菌糠表面应该含有大量的吸附点位,因此在用菌糠吸附磺胺类抗生素时,应合理调节溶液pH和离子量,使用特定吸附剂先分离影响吸附的不利离子。茹瑞红等^[30]研究杏鲍菇菌糠对酚酸类物质的降解效果,发现地黄连根际土壤中的对羟基苯甲酸和香草醛降解达到90%以上,还可有效增加重茬地黄连的干重达3.66倍。

3.3 菌糠对残留农药的吸附与降解特性 Purnomo 等^[31] 研究平菇菌糠对 DDT 的吸附与降解, 经过 28 d 的培养, 灭菌土壤与非灭菌中的 DDT 含量分别下降了 40% 和 80%, 说明平菇菌糠对 DDT 既有本身结构与官能团的物理吸附和化学吸附, 又存在菌糠中微生物的生物吸附, 菌糠的施用可以促进土壤中 DDT 的降解, 合理调节菌糠微结构与土壤比例, 以提高对 DDT 的吸附能力。Marín-Benito 等^[32] 研究菌糠对葡萄园土壤中甲霜灵等杀菌剂的降解能力, 结果表明, 施用菌糠可有效增加土壤的生物多样性, 加入菌糠的土壤对多种杀菌剂去除效率高于未加入菌糠土壤, 比未加入菌糠对照去除率最低高出 1.8 倍, 说明菌糠对土壤杀菌剂有很好的分解吸附能力, 可在水果、蔬菜杀菌剂污染方面的后续处理中深入研究。

3.4 改性菌糠吸附特性 马友文等^[8] 研究菌糠在 0.3 mol/L NaOH 改性 90 min 后, 对结晶紫的脱色率和吸附量分别达到 94.34%、19.18 mg/L, 吸附效果优于酶分解^[33], 吸附过程符合二级动力学模型, 且改性后菌糠提高了对溶液结晶紫的去除特性, 说明菌糠中存在着可以去除结晶紫的官能团和游离态离子, 去除过程不是单一的物理吸附, 而是伴随着化学沉淀过程。

4 其他吸附

4.1 菌糠基保水剂特性研究 程志强等^[2] 以木耳菌糠和丙烯酸为原料, 通过微波辐射加热水溶液聚合法合成菌糠基复合保水剂, 常压下蒸馏水吸附量达到 759 g/g, 吸水后凝胶强度较大, 具有成本低、效果好等优点, 可以广泛替代传统树脂式保水剂, 在保水性农林方面可产生巨大的经济效益, 也可试探性研究该类生物质保水剂在戈壁滩种树、植草上的效果。

4.2 菌糠对土壤营养元素的吸附作用 菌糠所含的 N、P、K 等作物必需营养元素高于稻草、鲜粪等, 同时其本身结构和所含丰富官能团对微量元素也有很大的吸附作用。关跃辉等^[34] 研究施用菌糠蔬菜地比不施用菌糠的蔬菜地有机质增加 0.7% ~ 23.2%, 全氮增加 4.3% ~ 57.1%, 速效磷增加 22.3% ~ 170.8%, 速效钾提高 9.0% ~ 64.0%。Zheng 等^[35] 研究杏鲍菇菌糠高温堆肥与土壤混合制取水稻育秧基质, 结果表明, 土壤、菌糠肥体积比为 2:8 时, 育秧盘的容重、总孔隙度、通气孔隙和持水孔隙有很大改善作用, 可有效提高育秧基质的 N、P、K 含量, 增加秧苗干物质积累和秧苗根系发育, 现阶段菌糠肥并没有推广, 应研究各菌糠肥对作物生长各阶段的生长特性与规律, 合理调配菌糠混合物, 压缩体积, 便于推广。

4.3 菌糠活性炭的吸附特性 菌糠由秸秆、木屑等组成, 含有丰富的有机质, 其热解后结构与秸秆、木材等有相似之处, 且活化能较高^[36]。刘向东等^[37] 研究木耳菌糠的最佳热解条件, 热解温度在 300 ~ 400 °C 时, 产炭率为 47.50% ~ 28.86%, pH 在 7.7 ~ 9.8, 偏碱性, 产炭形状不规则, 表面分布大量不规则孔隙, 孔隙间质地密, 孔内分布许多微孔, 具有较强的吸附能力。周锋利^[38] 研究木耳菌糠用水蒸气活化法热解后对碘吸附值高达 1009.09 mg/g, 说明该条件下活性炭具有较强碘

吸附能力, 探索不同热解条件下生产的生物炭对各水溶性物质的萃取提供科学理论。

5 菌糠吸附剂利用存在的问题与展望

我国菌糠产量巨大, 但总体有效利用率很低; 研究方向多样化, 对菌糠吸附剂的研究尚处于发展阶段, 研究中的多数又集中在原始菌糠, 对菌糠改性、热解、混合、堆肥后的吸附规律鲜有研究。作为重金属吸附剂研究, 仅限于几种常见原料菌糠, 对菌糠类型和掺入成分等因素对吸附性能的影响需进行深入研究; 菌糠生物炭研究尚存在热解后菌糠成分、结构变化研究不统一问题, 相同试验同类原料的试验结果往往相差很大。对于有机污染物吸附剂工作机理、试验环境、石油类污染物去除多样性也有待于进一步研究。

菌糠在我国分布广、产量大、易于获得, 且由于菌糠本身就具有很强的吸附能力, 经过改性、热解或混合制成吸附效果强的吸附剂, 不仅是对污染废物的资源化利用, 且可大大增加土壤墒情, 还会对各种重金属和其他无机污染物产生吸附和钝化效能; 尤其对难降解有机污染物也可快速分解。对菌糠改性及热解生物炭开发进一步研究, 将成为今后研究的热点, 也将为菌糠吸附剂规模化、专业化应用打下良好的理论基础。

参考文献

- [1] 袁志辉, 刘小文, 李常健, 等. 菌糠酶及其对环境污染物质修复功能的研究进展[J]. 食用菌学报, 2016, 23(2): 110-118.
- [2] 程志强, 杨鸿嘉, 康立娟, 等. 木耳菌糠基农用复合保水剂制备与吸水保水性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(1): 83-88.
- [3] KLIMMEK S, STAN H J, WILKE A, et al. Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel, and zinc by algae [J]. Environmental science & technology, 2001, 35(21): 4283-4288.
- [4] KARAS P A, PERRUCHON C, EXARHOU K, et al. Potential for bioremediation of agro-industrial effluents with high loads of pesticides by selected fungi [J]. Biodegradation, 2011, 22(1): 215-228.
- [5] ZHU W, XU X J, XIA L, et al. Comparative analysis of mechanisms of Cd²⁺ and Ni²⁺ biosorption by living and nonliving *Mucoromycote* sp. XLC [J]. Geomicrobiology journal, 2016, 33(3/4): 274-282.
- [6] 张亨, 韩建东, 李瑾, 等. 食用菌菌渣综合利用与研究现状[J]. 山东农业科学, 2016, 48(7): 146-150.
- [7] 刘莹莹, 张坚, 王红兵, 等. 菌糠酶提取与制备方法研究[J]. 湖南农业科学, 2010(1): 88-89, 92.
- [8] 马友文, 杨兴, 李萍, 等. 改性菌糠对水中结晶紫的吸附特性研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(3): 241-244.
- [9] 彭涛, 余水静, 程素. 食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(9): 78-80.
- [10] 张庆玉, 陈诚, 李小林, 等. 金针菇菌渣不同处理方式对环境的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 822-825.
- [11] HUANG Q Q, JIA Y, WAN Y A, et al. Market survey and risk assessment for trace metals in edible fungi and the substrate role in accumulation of heavy metals [J]. Journal of food science, 2015, 80(7): 612-618.
- [12] 朱萌. 金针菇培养物对重金属吸附特性的研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2013.
- [13] 张芝利. 生物吸附法对水中重金属离子的处理研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2011.
- [14] 孙玉寒, 周飞, 王钦钦, 等. 食用菌菌糠对重金属离子的吸附性[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(1): 51-54.
- [15] 刘兆伟, 王凯, 张晓娣, 等. 改性食用菌菌糠对重金属离子的吸附特性研究[J]. 科技视界, 2013, 29(16): 19-20.
- [16] 孙玉寒, 周飞, 任芸芸, 等. 食用菌菌糠对废水中 Cr(VI) 的吸附能力研究[J]. 食用菌, 2011(1): 61-63.
- [17] 藏婷婷, 胡晓娟, 顾海东, 等. 黑木耳菌糠对 Cu²⁺ 的生物吸附及其机理[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1421-1428.
- [18] 张芝利, 周飞. 改性菌糠对水中铜离子的吸附能力[J]. 西安工程大学学报, 2012, 26(1): 62-66.

- [6] 王瑞,张福耀,程庆军,等.利用 SSR 荧光标记构建 20 个高粱品种指纹图谱[J].作物学报,2015,41(4):658-665.
- [7] SAWADOGO N,BATIENO T B J,KIEBRE Z,et al.Assessment of genetic diversity of Burkina Faso sweet grain sorghum using microsatellite markers [J].African journal of biotechnology,2018,17(12):389-395.
- [8] YUSUF Z,PETROS Y,ARARSA K.Genetic diversity of sorghum(*Sorghum bicolor* L.Moench) from east and west hararghe zones of oromia Regional State,Ethiopia,Based on SSR Markers[J].World research journal of agricultural sciences,2018,5(1):132-140.
- [9] CASA A M,PRESSOIR G,BROWN P J,et al.Community resources and strategies for association mapping in sorghum[J].Crop science,2008,48(1):30-40.
- [10] DANG X J,THI T G,DONG G S,et al.Genetic diversity and association mapping of seed vigor in rice(*Oryza sativa* L.)[J].Planta,2014,239(6):1309-1319.
- [11] LI W Z,LIANG C B,WANG M Q,et al.Correlation analysis of yield and photosynthetic traits with simple repeat sequence(SSR) markers in maize [J].International journal of agriculture and biology,2017,19(5):1079-1086.
- [12] BOUSBA R,BAUM M,JIGHLY A,et al.Association analysis of genotypic and phenotypic traits using SSR marker in durum wheat[J].Online international interdisciplinary research journal,2013,3(6):60-79.
- [13] MOHAMMED R,ARE A K,MUNGHATE R S,et al.Pattern of genetic inheritance of morphological and agronomic traits of sorghum associated with resistance to sorghum shoot fly,*Atherigona soccata* [J].Euphytica,2018,214(2):1-20.
- [14] GELLI M,MITCHELL S E,LIU K,et al.Mapping QTLs and association of differentially expressed gene transcripts for multiple agronomic traits under different nitrogen levels in sorghum[J].BMC Plant Biology,2016,16(1):16.
- [15] UPADHYAYA H D,WANG Y H,SINGH S,et al.SSR markers linked to kernel weight and tiller number in sorghum identified by association mapping[J].Euphytica,2012,187(3):401-410.
- [16] BILLOT C,RIVALLAN R,SALL M N,et al.A reference microsatellite kit to assess for genetic diversity of *Sorghum bicolor* (Poaceae) [J].American journal of botany,2012,99(6):245-250.
- [17] BENBOUZA H,JACQUEMIN J M,BAUDOIN J P,et al.Optimization of a reliable,fast,cheap and sensitive silver staining method to detect SSR markers in polyacrylamide gels[J].Biotechnol Agron Soc Environ,2006,10(2):77-81.
- [18] AGRAMA H A,TUINSTRAN M R.Phylogenetic diversity and relationships among sorghum accessions using SSRs and RAPDs[J].African journal of biotechnology,2003,2(10):334-340.
- [19] GELETA N,LABUSCHAGNE M T,VILJOEN C D.Genetic diversity analysis in sorghum germplasm as estimated by AFLP,SSR and morpho-agronomical markers [J].Biodiversity & conservation,2006,15(10):3251-3265.
- [20] 赵香娜,岳美琪,刘洋,等.国内外甜高粱种质遗传多样性的 SSR 分析 [J].植物遗传资源学报,2010,11(4):407-412.
- [21] 倪先林,赵甘霖,刘天朋,等.利用 SSR 标记分析糯高粱种质资源的遗传多样性[J].农业科学与技术:英文版,2016,17(3):499-504.
- [22] WANG M L,ZHU C,BARKLEY N A,et al.Genetic diversity and population structure analysis of accessions in the US historic sweet sorghum collection[J].Theoretical & applied genetics,2009,120(1):13-23.
- [23] 赖勇,王鹏喜,范贵强,等.大麦 SSR 标记遗传多样性及其与农艺性状关联分析[J].中国农业科学,2013,46(2):233-242.
- [24] GUPTA P K,RUSTGI S,KULWAL P L.Linkage disequilibrium and association studies in higher plants;Present status and future prospects [J].Plant molecular biology,2005,57(4):461-485.
- [25] BHOSALE S U,STICH B,RATTUNDE H F,et al.Association analysis of photoperiodic flowering time genes in west and central African sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] [J].BMC Plant Biology,2012,12(1):1-10.

(上接第 19 页)

- [19] 胡晓娟,藏婷婷,顾海东,等.平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能[J].环境科学,2014,35(2):669-677.
- [20] 邵云,王文斐,李学梅,等.三种有机物料对铬污染土壤理化性质及小麦生长发育特征的影响[J].麦类作物学报,2016,36(6):779-788.
- [21] 王未君,耿存珍.吸附材料处理重金属废水的研究进展[J].环境科技,2014,27(1):58-63.
- [22] WANG F L,OUYANG W,HAO F H,et al.In situ remediation of cadmium-polluted soil reusing four by-products individually and in combination [J].Journal of soils and sediments,2014,14(3):451-461.
- [23] JING X B,CAO Y R,ZHANG X Y,et al.Biosorption of Cr(VI) from simulated wastewater using a cationic surfactant modified spent mushroom [J].Desalination,2011,269(1/2/3):120-127.
- [24] 王腾,王效举,张建国,等.不同菌糠肥料对灌区玉米生长、土壤 Cu 形态及酶活性的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(10):40-44.
- [25] 张雨萍,盛婧,孙国锋,等.养猪舍不同发酵床重金属累积特征初探 [J].农业环境科学学报,2014,33(3):600-607.
- [26] 罗东霞,张淑娟,杨瑞强.藏东南季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析[J].环境科学,2016,37(7):2745-2755.
- [27] OKA K,ISHIHARA A,SAKAGUCHI N,et al.Antifungal activity of volatile compounds produced by an edible mushroom *Hypsizygus marmoreus* against phytopathogenic fungi [J].J. Phytopathol,2015,163(11/12):987-996.
- [28] 宋雪英,梁茹晶,孙礼奇,等.以菌糠为调理剂的柴油污染土壤堆肥技术[J].沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(3):179-183.
- [29] 王佳丽,张玉玲,钱红,等.吸附法去除低温水体中的磺胺类抗生素 [J].吉林大学学报(理学版),2016,54(3):663-669.
- [30] 茹端红,李烜桢,黄晓书,等.食用菌菌渣缓解地黄连作障碍的研究 [J].中国中药杂志,2014,39(16):3036-3041.
- [31] PURNOMO A S,MORI T,KAMEI I,et al.Application of mushroom waste medium from *Pleurotus ostreatus* for bioremediation of DDT-contaminated soil [J].International biodeterioration & biodegradation,2010,64(5):397-402.
- [32] MARÍN-BENITO J M,ANDRADES M S,SÁNCHEZ-MARTÍN M J,et al. Dissipation of fungicides in a vineyard soil amended with different spent mushroom substrates [J].Journal of agricultural and food chemistry,2012,60(28):6936-6945.
- [33] 厉娜,栗君,卢磊,等.固定化漆酶在染料脱色中的应用 [J].南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(5):129-133.
- [34] 关跃辉,李玉荣,张树槐.食用菌菌糠对保护地土壤的改良效果 [J].安徽农业科学,2008,36(5):1955-1956.
- [35] ZHENG D,WANG Y,ZHAO C X,et al.Preparation of rice seedling-raising substrate with spent mushroom substrate of *Pleurotus eryngii* [J].Agricultural science & technology,2016,17(2):476-480.
- [36] 杨紫敬,王黎明.菌糠热解特性及动力学分析 [J].江苏农业科学,2015,43(12):364-366.
- [37] 刘向东,董雪,隋欢,等.农作物废弃物制备生物炭的实验研究 [J].佳木斯大学学报(自然科学版),2016,34(3):330-332.
- [38] 周锋利.沙柳木屑栽培杏鲍菇与菌糠利用技术研究 [D].杨凌:西北农林科技大学,2013.

科技论文写作规范——题名

以最恰当、最简明的词句反映论文、报告中的最重要的特定内容,题名应避免使用不常见的缩略语、首字母缩写词、字符、代号和公式等。一般字数不超过 20 字。英文与中文应相吻合。英文题名词首字母大写,连词及冠词除外。