

基于小檗碱和沼液的药肥一体化水剂制备及其功能研究

刘金蓉^{1,2}, 李映^{1,3}, 田平芳², 李可意^{1,3}, 葛喜珍^{1,3,*}

(1.北京联合大学生物化学工程学院, 北京 100023;

2.北京化工大学生命科学与技术学院, 北京 100029;

3.生物质废弃物资源化利用北京市重点实验室, 北京 100023)

摘要:为了研究沼液药肥一体化水剂配方和功能。方法:首先将磁石和石膏与沼液混合,再加硅藻土净化;然后以水不溶物含量为指标,通过正交试验筛选氮磷钾矿质养分的最佳添加量,将之与小檗碱配合制备成沼液药肥一体化水剂;测定其对番茄灰霉病菌的抑制效果及对白菜生长的影响。结果表明:沼液净化后,其中铁、锰、锌含量增加,铜离子及重金属离子含量明显降低;以0.01%小檗碱、17%尿素、9%磷酸二氢钾、10%硝酸钾和8%黄腐酸(沼液补至100%)制备的沼液药肥一体化水剂,其N:P₂O₅:K₂O质量比:8.51:4.18:7.87,N、P₂O₅、K₂O总和即养分含量为205.6 g/L,能满足作物对养分的需求。抑菌实验表明,沼液药肥一体化水剂对番茄灰霉病菌有较强抑制作用,EC₅₀为12.12 μg/mL,是小檗碱水剂(抑制番茄灰霉病菌的EC₅₀为398.11 μg/mL)EC₅₀的3.04%。沼液药肥一体化水剂稀释150倍后(即养分含量为1.67 g/L)喷施白菜能有效加速植株生长。结论:该研究为提高沼液抑菌效果和肥效,开发以沼液和小檗碱为主要原料的药肥一体化水剂提供科学依据。

关键词:小檗碱,沼液,药肥一体化水剂,番茄灰霉病,水溶肥

Preparation and Function of Medicine and Fertilizer Integrated Aqua based on Berberine and Biogas Slurry

LIU Jin-rong^{1,2}, LI Ying^{1,3}, TIAN Ping-fang², LI Ke-yi^{1,3}, GE Xi-zhen^{1,3,*}

(1.College of Biochemical Engineering, Beijing Union University, Beijing 100023, China;

2.College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3.Beijing Key Laboratory of Biomass Waste Resource Utilization, Beijing 100023, China)

Abstract: The objective of our study is to refine the formula and to examine the function of medicine and fertilizer integrated aqua. First, the biogas slurry was purified by mixing with the magnet, gypsum and diatomite. The ratio of mineral nutrients N, P, K were optimized by orthogonal test using the content of water-insoluble as an index, and the optimum formula was combined with berberine to prepare the medicine and fertilizer integrated aqua. The inhibitory effect of this novel medicine and fertilizer integrated aqua on *Botrytis cinerea* and its impact on the growth of Chinese cabbage were assayed. Results showed that after purification, the concentration of Fe, Mn and Zn elements increased while Cu and other heavy metal ion sharply declined. In the medicine and fertilizer integrated aqua (0.01% berberine, 17% urea, 9% potassium dihydrogen phosphate, 10% potassium nitrate and 8% fulvic acid, followed by a fill-up of biogas slurry), the mass ratio of N: P₂O₅: K₂O was 8.51: 4.18: 7.87, and the sum of N, P₂O₅ and K₂O means that the nutrient content was 205.6 g/L, which could meet the crop's nutrient needs. The results of antibacterial tests proved that medicine and fertilizer integrated aqua had a strong inhibitory effect on *Botrytis cinerea*, EC₅₀ could be reduced to 12.12 μg/mL, which was reduced by 3.04% compared with the EC₅₀ of the berberine aqua (398.1 μg/mL). The growth of Chinese cabbage was effectively promoted by spraying 150 times diluted medicine and fertilizer integrated aqua (the nutrient content is 1.67 g/L). This study provided a scientific reference for improving antibacterial effect and fertilizer efficiency of biogas slurry and developing medicine fertilizer with biogas slurry and berberine as the main raw material.

Key words: berberine; biogas slurry; medicine and fertilizer integrated aqua; tomato gray mold; water soluble fertilizer

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2018)19-0309-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.054

收稿日期: 2017-11-02

作者简介: 刘金蓉(1994-),女,硕士研究生,主要从事微生物代谢方面的研究, E-mail: 1660565661@qq.com。

* 通讯作者: 葛喜珍(1968-),女,博士,教授,主要从事植物源农药和微生物代谢方面的研究, E-mail: gexizhen@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0201105);北京联合大学人才强教项目。

引文格式:刘金蓉,李映,田平芳,等.基于小檗碱和沼液的药肥一体化水剂制备及其功能研究[J].食品工业科技,2018,39(19):309-313,332.

沼液是禽畜粪便等有机物经厌氧发酵的残留液体^[1]。沼液营养丰富,含丰富的氮、磷、钾、氨基酸、微量元素、B族维生素、多种水解酶、有机酸和腐植酸等生物活性物质,具抑菌和抗逆等功效^[2]。研究发现,沼液与化肥配施时,能明显提高油菜产量和品质^[3];果树灌溉沼液不仅能促进叶片生长,且果实膨大,品质明显改善^[4];沼液作叶面肥喷施作物,叶片变厚、叶绿素含量增加,光合作用增强^[5]。此外,沼液作叶面喷肥可防治病虫害,减少农药使用和农药残留^[6],已有报道^[7],沼液对粮食、经济作物、花卉、水果和蔬菜等24种作物中的40种病害具有一定的防治效果。虽沼液用途广泛,但部分沼液重金属超标、营养成分不完善^[8-9],不能被有效利用,如何去除沼液中重金属、合理应用沼液是废弃物利用的重要研究方向。

小檗碱是从黄连、黄柏等植物中提取的异喹啉类生物碱^[10],对多种G⁺、G⁻细菌、丝状真菌和酵母菌以及原虫均具抑制作用^[11-12],对多种真菌和细菌性病害甚至对畜牧动物有抑菌、消炎活性,对蚜虫、螨类等具有防治活性,能清除田间杂草^[13-15]。作为广谱农业杀菌剂,小檗碱环境相容性好、安全、对非靶标生物毒性低、植物病原真菌对其不易产生抗性、在自然环境中降解快,在无公害农业生产和绿色食品生产中有广阔的应用前景^[16]。

肥料和农药是农业生产不可缺少的重要生产资料,对于减少病虫害、提高农产品产量和品质有着重要作用,农业生产中一般将二者分开施用,而现代农业要求农田作业尽量省时、高效、节约成本^[17]。目前关于沼液与小檗碱复配的药肥一体化应用研究未见报道。本研究在沼液中添加氮、磷、钾矿质养分,将之与小檗碱配合,制备沼液药肥一体化水剂,并通过抑菌和植物生长试验初步证明此复合药肥的抑菌效果和肥效,为环境友好型沼液复合药肥一体化应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小檗碱 西安科慧生物有限公司;磁石、石膏 安国长安中药材有限公司;沼液 由北京郊区农场提供;小白菜(绿星青菜品种) 中国农业科学院蔬菜花卉研究所;黄腐酸 上海伊卡生物技术有限公司;尿素、磷酸二氢钾 北京化工厂;硝酸钾 天津市福晨化学试剂厂;番茄灰霉病菌 由河北农业大学植保学院杨文香教授提供。

PDA培养基:土豆300g;葡萄糖20g;琼脂15g;蒸馏水1000mL。

MS105电子天平 北京北方首衡电子科技有限公司;85-2数显恒温磁力搅拌器 江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;HC014-11-018-01(X)立式灭菌锅 上海东亚压力容器制造有限公司;LRH-150生化培养箱 上海一恒科技有限公司;ZHJH-C1106C超净台 上海智城分析仪器制造有限公司;

DHG-9023A电热恒温鼓风干燥箱 上海益恒实验仪器有限公司;PS-40A超声波清洗机 深圳市超艺达科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 沼液净化 将磁石和石膏分别粉碎,过80目筛,备用。取2L沼液原液,将磁石和石膏粉末加入沼液,磁石和石膏的投加量分别为60、70mg,以260r/min搅拌26s,然后以50r/min慢速搅拌25min,沉淀60min,过滤,取上清得溶剂I。向溶剂I中加入140g硅藻土,以50r/min搅拌30min,沉淀35min,过滤,取上清843mL,得含沼液的溶剂II即为试验试样。

参照国家标准(NY/T 1973-2010水溶肥料水不溶物含量和pH的测定;NY/T 1976-2010水溶肥料有机质含量的测定;NY/T 1977-2010水溶肥料总氮、有效磷、钾含量的测定;NY/T 1974-2010水溶肥料铜、铁、锰、锌、硼、钼含量的测定;NY/T 1978-2010肥料汞、砷、镉、铅、铬含量的测定)取三次样品检测沼液净化前后的成分及基本理化性质的变化。

1.2.2 水溶肥料的制备 以沼液溶剂II为母液,选用尿素、磷酸二氢钾、硝酸钾、黄腐酸为供N、P₂O₅、K₂O和腐植酸的原料^[18],以“含腐殖酸水溶肥料(大量元素型)(NY1106-2010)”为标准,设计四因素三水平正交试验(因素水平排列见表1),以水不溶物含量为指标,筛选水溶肥料最佳配方,并按此配方制备水溶肥料。测定方法参照NY/T 1973-2010水溶肥料水不溶物含量。

表1 正交试验因素水平表
Table 1 Factors and levels of orthogonal tests

水平	A 尿素 (%)	B 磷酸二氢钾 (%)	C 硝酸钾 (%)	D 黄腐酸 (%)
1	15	7	10	6
2	17	9	12	7
3	19	11	14	8

1.2.3 沼液药肥一体化水剂的制备 采用超声后静置法^[19]测定常温下小檗碱在水溶肥料中的溶解度(W/V),根据测得的溶解度确定小檗碱的添加量,将小檗碱与水溶肥料配合制备成沼液药肥一体化水剂,该水剂由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所土壤肥料测试中心检测其中N、P、K等的含量。

1.2.4 小檗碱水剂和沼液药肥一体化水剂对番茄灰霉病菌毒力的影响 设置小檗碱水剂浓度梯度分别为32、64、128、256、512 μg/mL。配制上述浓度的加药(即加小檗碱)PDA培养基,用直径0.8cm打孔器取培养96h的番茄灰霉病菌菌饼,接种至上述PDA固体培养基,每处理重复3次,28℃培养。番茄灰霉病菌培养60h后用十字交叉法测量菌落直径,按照

式(1)计算抑制率^[20-21]。根据机率值换算表,将抑制百分率换算成抑制机率值。以试验中设定的浓度对数为横坐标,抑制机率值为纵坐标,计算毒力回归方程和半数最大效应浓度(Concentration for 50% of maximal effect, EC₅₀)。

沼液药肥一体化水剂中小檗碱浓度梯度为 8、16、32、64 μg/mL。实验方法同上。

抑制率(%) = 100 × (空白组菌落直径 - 加药处理组菌落直径) / 空白组菌落直径式(1)

1.2.5 沼液药肥一体化水剂对白菜生长的初步试验 本研究采用盆栽种植白菜,基质由蛭石、珍珠岩、草炭以 1:1:2 的比例混配,土壤组成按照壤土、基质、有机肥以 1:3:1 混匀即可^[22]。试验设置不同浓度沼液药肥一体化水剂,共设 6 个处理,即水剂稀释 50、150、300、400、500 倍喷施及对照组(清水)。待供试白菜第 3 片真叶长出时开始第一次追肥,之后每隔 5 d 追肥一次,追施第 3 次后采收^[23]。测定指标包括:株高和生物量,株高测定:每个处理随机抽取 6 株,在营养生长盛期,用直尺测定植株的株高,株高测定时高度统一为从根茎连接处到顶端分支处;生物量测定:在生殖生长盛期采用电子秤测定不同处理的各植株地上部干重(60 °C 烘干)等。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 整理数据,采用 SPSS Statistics 软件处理数据,并进行显著性分析,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 沼液净化结果

沼液净化前后的成分及基本理化性质实验结果如表 2 所示。

表 2 沼液净化前后的成分及基本理化性质
Table 2 Composition and basic physical and chemical properties of biogas slurry before and after purification

指标	净化前(原沼液)	净化后
pH	7.35 ± 0.05	7.45 ± 0.08
有机质(%)	0.131 ± 0.005	0.132 ± 0.003
N(%)	0.080 ± 0.002	0.080 ± 0.003
P ₂ O ₅ (%)	未检出	0.010 ± 0.002
K ₂ O(%)	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.02
有效铁(mg/L)	119.19 ± 1.93	153.84 ± 2.05
有效锰(mg/L)	1.268 ± 0.031	1.562 ± 0.012
有效锌(mg/L)	0.032 ± 0.015	0.045 ± 0.013
有效铜(mg/L)	0.004 ± 0.001	0.001 ± 0.003
汞(mg/kg)	未检出	未检出
砷(mg/kg)	< 8.4 × 10 ⁻³ ± 1.1 × 10 ⁻³	< 2.7 × 10 ⁻³ ± 0.92 × 10 ⁻³
镉(mg/kg)	1.01 ± 0.07	0.41 ± 0.03
铅(mg/kg)	6.10 ± 0.11	3.80 ± 0.13
铬(mg/kg)	1.00 ± 0.02	< 0.60 ± 0.03

沼液净化后,其中的铁、锰、锌含量增加,铜离子及重金属离子含量明显降低。推测铁、锰、锌含量增加与磁石、石膏和硅藻土成分有关:磁石除主成分 Fe

元素含量高外,还含有丰富的 Zn、Mn、Cu、Co、Ca 等元素^[24];石膏中除 Ca 元素外,主要含有 Sr、Al、Fe、Mg、K 等元素^[25];硅藻土的成分中 80% 以上为 SiO₂·nH₂O,也含有少量的 Al、Fe、Ca、Mg、Na、K、P 等^[26]。而铜离子及重金属离子含量降低与石膏和硅藻土的性状有关:石膏比表面积大,硅藻土孔隙率高、比表面积大、吸附性能强、性质稳定且无二次污染^[27],而且目前应用硅藻土处理铜离子和重金属离子已有报道^[28-30]。

2.2 水溶肥料的配方筛选结果

水溶肥料配方筛选结果见表 3。由极差分析结果可知,各个因素影响的主次顺序是磷酸二氢钾、硝酸钾、尿素、黄腐酸。由正交试验结果可知,最佳配方组合为 A₂B₂C₁D₃,即尿素用量 17%,磷酸二氢钾用量 9%,硝酸钾用量 10%,黄腐酸用量 8%,沼液补至 100%。

表 3 正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal tests

试验号	因素				水不溶物含量(%)
	A 尿素(%)	B 磷酸二氢钾(%)	C 硝酸钾(%)	D 黄腐酸(%)	
1	15	7	10	6	0.10
2	15	9	12	7	0.21
3	15	11	14	8	0.50
4	17	7	12	8	0.13
5	17	9	14	6	0.26
6	17	11	10	7	0.32
7	19	7	14	7	0.38
8	19	9	10	8	0.12
9	19	11	12	6	0.42
K ₁	0.81	0.61	0.54	0.78	
K ₂	0.71	0.59	0.76	0.91	
K ₃	0.92	1.24	1.14	0.75	
k ₁	0.270	0.203	0.180	0.260	
k ₂	0.237	0.197	0.253	0.303	
k ₃	0.307	0.413	0.380	0.250	
R	0.21	0.65	0.60	0.16	
因素主→次	B、C、A、D				
优方案	A ₂ B ₂ C ₁ D ₃				

2.3 沼液药肥一体化水剂检测结果

实验测定 25 °C 下小檗碱在最佳配方中的溶解度为 0.014% ± 0.002% (W/V),在最佳配方中添加 0.01% 小檗碱制成沼液药肥一体化水剂,其养分含量检测结果见表 4,由表 4 可知,制备的沼液药肥一体化水剂 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 85.1、41.8、78.7 g/L,符合 NY1106-2010 标准,其中 N、P₂O₅、K₂O 总和 = 205.6 g/L ≥ 200 g/L,能满足作物对养分的需求。此沼液药肥一体化水剂中,药和养分的比例是 1:2056。

2.4 小檗碱水剂对菌毒力的影响

小檗碱水剂浓度梯度为 32、64、128、256、512 μg/mL(图 1),通过测定不同浓度梯度小檗碱水

表4 沼液药肥一体化水剂检测结果
Table 4 Test results of water soluble fertilizer

指标	测定方法	检测值(g/L)	NY1106-2010
总N含量		85.1	
P ₂ O ₅ 含量	水溶肥料 总氮、磷、钾含量的测定(NY/T 1977-2010)	41.8	N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 总和≥200 g/L
K ₂ O含量		78.7	

表5 小檗碱对番茄灰霉病菌的抑制率(60 h)
Table 5 Inhibition rate of berberine on *Botrytis cinerea* (60 h)

小檗碱浓度 X(μg/mL)	0	32	64	128	256	512
抑菌圈直径(mm)	54.50 ± 1.73	51.15 ± 1.35	48.33 ± 1.04	44.00 ± 0.50	35.00 ± 1.80	28.50 ± 0.40
菌落直径(mm)	46.50 ± 1.73	43.15 ± 1.35	40.33 ± 1.04	36.00 ± 0.50	27.00 ± 1.80	20.50 ± 0.40
抑制率 y(%)		7.20	13.30	22.60	41.90	55.90
机率值 Y		3.5389	3.8877	4.2479	4.7955	5.1484

剂对番茄灰霉病菌的抑制率(表5),得毒力回归方程 $y = 0.9124x + 3.54439$, 决定系数 $R^2 = 0.99333$, 当抑制率为50%时,机率值 $Y = 5.0000$,小檗碱水剂抑制番茄灰霉病菌的 EC_{50} 为 $398.11 \mu\text{g/mL}$ 。

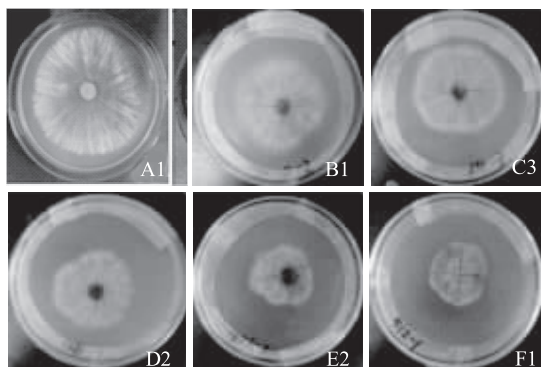


图1 小檗碱对番茄灰霉病菌的抑制效果

Fig.1 Effect of berberine on inhibition of *Botrytis cinerea*

注:A1:空白对照;B1:小檗碱浓度 $32 \mu\text{g/mL}$;

C3:小檗碱浓度 $64 \mu\text{g/mL}$;D2:小檗碱浓度 $128 \mu\text{g/mL}$;

E2:小檗碱浓度 $256 \mu\text{g/mL}$;F1:小檗碱浓度 $512 \mu\text{g/mL}$ 。

2.5 沼液药肥一体化水剂中小檗碱对菌毒力的影响

沼液药肥一体化水剂中小檗碱浓度梯度为 $8、16、32、64 \mu\text{g/mL}$ (图2),该水剂抑制番茄灰霉病菌的 EC_{50} 为 $12.12 \mu\text{g/mL}$ 。

对毒力测定结果进行分析,沼液药肥一体化水剂的 EC_{50} 与小檗碱水剂比较,降低了很多,要实现50%的抑菌率,沼液药肥一体化水剂中小檗碱用量仅为小檗碱水剂中的3.04%,明显减少了小檗碱用量。沼液药肥一体化水剂不仅能增强小檗碱作为生物农药的杀菌药效,且实现水肥一体化,大大降低了使用成本。

2.6 沼液药肥一体化水剂对白菜生长的影响

由图3可知,沼液药肥一体化水剂随着稀释倍数的增加,株高增长量呈先增加后下降的趋势,在稀释300倍时增长量最大,为 14.36 cm ;稀释150倍时,增长量次之,为 13.83 cm ;稀释400倍时,株高增长量为第三,增长值为 12.71 cm 。经方差分析可知,该水剂稀释300倍和150倍时对株高的影响显著大于稀释400倍($p < 0.05$),而稀释300倍和150倍的处理

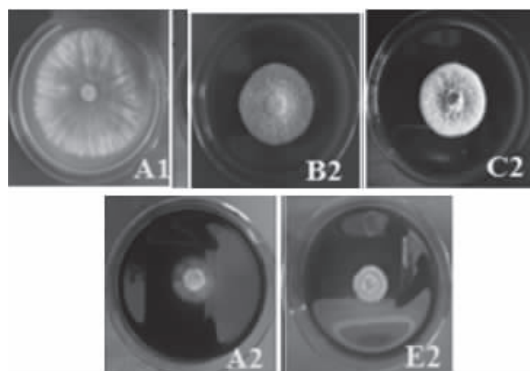


图2 沼液复合杀菌对番茄灰霉病菌的抑制效果

Fig.2 Inhibitory effect of compound disinfection of biogas slurry on Tomato Gray Mold

注:A1:空白对照;B2:小檗碱浓度 $8 \mu\text{g/mL}$;

C2:小檗碱浓度 $16 \mu\text{g/mL}$;A2:小檗碱浓度 $32 \mu\text{g/mL}$;

E2:小檗碱浓度 $64 \mu\text{g/mL}$ 。

间差异不显著($p > 0.05$)。可能是稀释300倍时营养元素足够植株生长,稀释150倍时,营养元素也未过剩。而稀释50倍时营养元素过多,稀释400倍和500倍时由于稀释度过高,导致肥料中可用的N、P、K浓度太低,因而不足植株生长发育所需,使得生长效果不及稀释300倍时效果好。

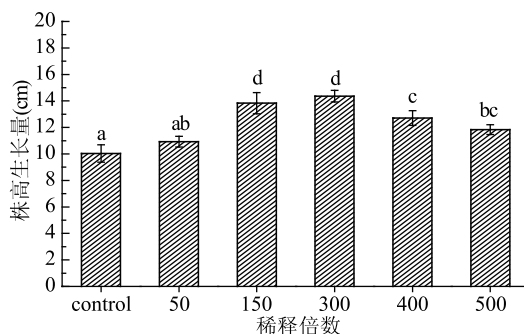


图3 不同处理对白菜生长的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the growth of Chinese cabbage

注:图中不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),相同小写字母表示差异不显著($p > 0.05$),图4同。

由图4可知,对于白菜的地上部干重来说,沼液药肥一体化水剂稀释150倍时最高,稀释300倍时次之,稀释400倍时第三,依次是:2.61、1.62、1.44 g,可能是随着施肥量减少,作物养分减少,而施用稀释50倍的沼液药肥一体化水剂几乎无增产作用,推测是由于肥料的过量施用影响了作物对元素的有效吸收,同时肥料中过量的盐分集结容易使土壤结块,养分失衡,阻碍作物对养分离物质的吸收转化^[23]。经方差分析可知,该水剂稀释150倍对地上部干重的影响显著大于稀释300倍和400倍($p < 0.05$)。

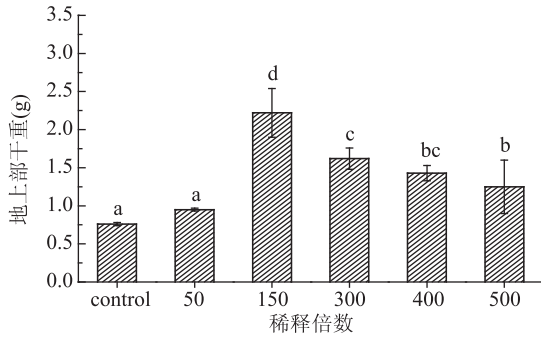


图4 不同处理对白菜生物量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on biomass of Chinese Cabbage

综合分析各稀释倍数对白菜株高和生长量的影响,沼液药肥一体化水剂稀释150倍即养分含量为1.67 g/L时有助于白菜增产。

3 结论

将磁石和石膏与沼液混合,再加硅藻土净化、沉淀,能明显增加沼液中铁、锰、锌含量增加,铜离子及重金属离子含量明显降低。本研究首次制备添加小檗碱的沼液药肥一体化水剂,其最佳配比及原辅料为:小檗碱0.01%,尿素17%,磷酸二氢钾9%,硝酸钾10%,黄腐酸8%,沼液补至100%,制备的药肥一体化配方N:P₂O₅:K₂O质量比:8.51:4.18:7.87。研究发现该水剂对番茄灰霉病菌有较强的抑制作用,EC₅₀为12.12 μg/mL,为小檗碱水剂EC₅₀的3.04%。白菜施用150倍稀释液即养分含量为1.67 g/L能有效加速植株生长。该研究为提高沼液抑菌效果和肥效,开发以沼液和小檗碱为主要原料的药肥一体化水剂提供科学参考。

参考文献

[1] Qin W, Egolfopoulos F N, Tsotsis T T. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 82: 157-172.
 [2] 沈其林,单胜道,周健驹,等.猪粪发酵沼液成分测定与分析[J].中国沼气,2014,32(3):83-86.
 [3] 宋丽芬,孙丽英,邵蕾,等.沼液施用对油菜生长及土壤环境影响研究[J].中国沼气,2017,35(6):83-88.
 [4] 柴小媛,王蒙,冯文涛,等.沼液不同施用方式对苹果园土壤及叶片养分和果实品质的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):64-70.
 [5] 田春丽,王喜枝,王崇华,等.我国沼液利用现状及存在问

题[J].河南农业,2016(6):34-35.
 [6] 伍四权,陈正才,喻永冰,等.沼液在农作物病虫害防治上的应用[J].湖北植保,2015(6):41,44.
 [7] 曹涤环.沼液沼渣在作物病虫害防治上的应用[J].农村新技术,2014(3):51-52.
 [8] 王霜,邓良伟,王兰,等.猪场粪污中重金属和抗生素的研究现状[J].中国沼气,2016,34(4):25-33.
 [9] 刘汨莎,张亚丽.沼液综合利用研究进展[J].辣椒杂志,2013(3):30-34.
 [10] Silva A R D, Neto J B D A, Silva C R D, et al. Berberine antifungal activity in fluconazole-resistant pathogenic yeasts: Action mechanism evaluated by flow cytometry and biofilm growth inhibition in *Candida* spp. [J]. Antimicrobial Agents & Chemotherapy, 2016, 60(6): 3551-3557.
 [11] Cernakova M, Kostalova D. Antimicrobial activity of berberine - a constituent of *Mahonia aquifolium* [J]. Folia Microbiol (Praha), 2002, 47(4): 375-378.
 [12] Iwasa K, Moriyasu M, Nader B, et al. Fungicidal and herbicidal activities of berberine related alkaloids [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2000, 64(9): 1998-2000.
 [13] Zhang H Y, Piao X S, Zhang Q, et al. The effects of *Forsythia suspensa* extract and berberine on growth performance, immunity, antioxidant activities, and intestinal microbiota in broilers under high stocking density [J]. Poultry Science, 2013, 92(8): 1981-1988.
 [14] Shen Y B, Piao X S, Kim S W, et al. The effects of berberine on the magnitude of the acute inflammatory response induced by *Escherichia coli* lipopolysaccharide in broiler chickens [J]. Poultry Science, 2010, 89(1): 13-19.
 [15] 钟慈平, 骞宇, 舒畅, 等. 小檗碱及其衍生物抑菌作用研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(7): 321-325.
 [16] 张兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685-698.
 [17] 邵光永, 郑伟年, 吴良欢. 植物源杀虫剂与氮磷钾混配叶面肥对小白菜施用效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 59-62.
 [18] 韩敏. 牛沼液净化处理及其水溶肥料研制[D]. 北京: 北京农学院, 2015.
 [19] 袁飞, 何琳, 丁沐淦. 静态法与动态法测定药物水中溶解度的探讨[J]. 广东药学报, 2010, 26(5): 462-465.
 [20] Ozcan M, Boyraz N. Antifungal properties of some herb decoctions [J]. European Food Research and Technology, 2000, 212(1): 86-88.
 [21] Hou D, Yan C, Liu H, et al. Berberine as a natural compound inhibits the development of brown rot fungus *Monilinia fructicola* [J]. Crop Protection, 2010, 29(9): 979-984.
 [22] 王亚慧. 盆栽蔬菜的基质配制[J]. 中国园艺文摘, 2013(12): 182-182.
 [23] 范蓓蓓. 浓缩沼液的配方有机液肥开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
 [24] 王丕明, 王承志, 龚千锋. 磁石饮片及其包装贮藏技术研究现状[J]. 江西中医药, 2013, 44(6): 66-68.

(下转第332页)

影响的研究进展[J].粮油食品科技,2015,2(23):22-25.

[20] Ririporn R, Benjakul S, Visessanguan W, et al. Acid-induced gelation of natural actomyosin from Atlantic cod (*Gadus morhua*) and burbot (*Lota lota*) [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23 (1): 26-39.

[21] 孔宝华, 韩建春. 肉品科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015: 126-127.

[22] Chan J K, Gill T A, Paulson A T. Thermal aggregation of myosin subfragments from cod and herring [J]. Journal of Food Science, 1993, 58 (5): 1057-1061.

[23] 李睿智, 王崑, 仪淑敏, 等. 白鲢鱼鱼糜凝胶过程中水分及凝胶特性的变化[J]. 现代食品科技, 2016, 32 (5): 91-97.

[24] 刘海梅. 鲢鱼糜凝胶及形成机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

[25] 励建荣, 余永名, 仪淑敏, 等. 鱼糜制品热凝胶形成机理研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36 (23): 380-385.

[26] 郭晓娟, 刘成梅, 吴建永, 等. 亲水胶体对淀粉理化性质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37 (6): 367-371.

[27] Pongsawatmanit R, Srijunthongsiri S. Influence of xanthan gum on rheological properties and freeze-thaw stability of tapioca starch [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88 (1): 137-143.

[28] Barrera A M, Ramirez J A, González-cabrales J J, et al. Effect of pectins on the gelling properties of surimi from silver carp [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16 (5): 441-447.

[29] 陈健, 吴国杰, 赵谋明. 食品化学原理[M]. 广东: 华南理工大学出版社, 2015: 104-105.

[30] 俞兰秀. 亲水胶体在牛奶布丁中的应用[J]. 食品工业, 2015 (7): 117-119

[31] Dai L, Wang B, An X. Oil/water interfaces of guar gum-based biopolymer hydrogels and application to their separation [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 169: 9-15.

[32] 赵光远, 许艳华, 陈美丽, 等. 浑浊石榴汁稳定性研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 7 (5): 25-29.

[33] 程媛, 刘忠义, 吴继军, 等. 中性甜玉米饮料增稠剂的筛选及稳定性研究[J]. 热带作物学报, 2017, 38 (8): 1553-1559

[34] Torres M D, Moreira R, Chenlo F, et al. Effect of water and guar gum content on thermal properties of chestnut flour and its

starch [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 22 (2): 192-198.

[35] 龚韵. 亲水胶体取代肉糜脂肪的研究[J]. 现代食品科技, 2016, 22 (3): 56-57.

[36] 汪学荣, 龚韵, 郭晓光. 亲水胶体对肉糜凝胶强度和持水性能的影响[J]. 肉类研究, 2005, 8: 37-39.

[37] 谢婷婷. 氯化镁对两种k-卡拉胶-肌原纤维蛋白体系凝胶特性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

[38] Ramírez J A, Uresti R M, Velazquez G, et al. Food hydrocolloids as additives to improve the mechanical and functional properties of fish products: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25: 1842-1852.

[39] Gravelle A J, Marangoni A G, Barbut S. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel stability: Influencing texture and microstructure using a model hydrophilic filler [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 415-424.

[40] Damodaran S S, Parkin K L, Fennema O R. 江波, 杨瑞金, 钟芳, 等, 译. 食品化学(第四版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 813

[41] 王艳霞, 张金丽, 张瑞婷. 鱼种和亲水胶体对鱼糜制品凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37 (2): 143-147.

[42] 陈海华, 薛长湖. 亲水胶体对竹夹鱼鱼糜流变特性的影响[J]. 食品科学, 2009, 30 (17): 52-55

[43] 陈海华, 薛长湖. 亲水胶体对大头狗母鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2009, 30 (5): 40-45.

[44] 魏燕霞, 谢瑞, 郭肖. 刺槐豆胶与黄原胶复配体系的流变性[J]. 食品科学, 2017, 38 (1): 149-153.

[45] 徐思恩, 胡炎华, 黄金鑫. 黄原胶特性及其在食品和复配胶中的应用[J]. 发酵科技通讯, 2017, 46 (1): 45-49.

[46] Binsi P K, Nayak N, Sarkar P C, et al. Gelation and thermal characteristics of microwave extracted fish gelatin-natural gum composite gels [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54 (2): 518-530.

[47] 黄诚, 尹红. 鱼糜凝胶特性改良条件研究[J]. 食品科学, 2009, 30 (24): 65-67.

[48] Ramírez J A, Barrera M, Morales O G, et al. Effect of xanthan and locust bean gums on the gelling properties of myofibrillar protein [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16 (1): 11-16.

(上接第313页)

[25] 王薇, 周才新, 张义生, 等. 不同产地石膏中微量元素的比较分析[J]. 中国药师, 2014, 17 (6): 972-974.

[26] 吴相川, 任雪云. 硅藻土理化特性及改性研究[J]. 西部皮革, 2016, 38 (14): 34.

[27] 任华峰, 苗英霞, 张雨山, 等. 硅藻土在水处理领域的应用研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32 (S1): 213-216.

(上接第327页)

[79] 程忠玲, 赵文辉. 海带中褐藻糖胶的酸提法研究[J]. 辽宁化工, 2008, 37 (8): 514-515.

[80] Hemmingson J A, Falshaw R, Furneaux R H, et al. Structure and antiviral activity of the galactofucan sulfates extracted from *Undaria*, *Pinnatifida* (Phaeophyta) [J]. Journal of Applied

Phycology, 2006, 18 (2): 185-193.

[28] 熊蕾, 阳立平, 彭清静. 硅藻土吸附处理铜离子废水的研究[J]. 能源环境保护, 2016, 30 (2): 17-21.

[29] 朱健, 王平, 罗文连, 等. 硅藻土吸附重金属离子研究现状及进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (7): 183-189.

[30] 李文强, 可成友, 可欣, 等. 改性硅藻土对重金属离子 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附研究[J]. 皮革与化工, 2016, 33 (2): 1-7, 10.

Phycology, 2006, 18 (2): 185-193.

[81] 聂小伟, 何粉霞, 陈志兵, 等. 响应面优化海带岩藻聚糖硫酸酯的提取工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38 (23): 44-49.