

秸秆腐熟剂对稻麦轮作田小麦赤霉病发生的影响

杨立军¹, 杨泽富², 张俊华², 吕亮¹, 李儒海¹, 袁斌¹ (1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室/农业农村部华中作物有害生物综合治理重点实验室, 湖北武汉 430064; 2. 湖北省宜城市农业农村局, 湖北宜城 441400)

摘要 选择稻-麦轮作模式秸秆还田短期定位试验田块, 于2016—2019年连续施用由棘孢木霉、黑曲霉、黑根霉、青霉4种不同微生物菌分别与枯草芽孢杆菌组合制成的秸秆腐熟剂, 于2018和2019年分别调查不同秸秆腐熟剂处理的小麦赤霉病病情。结果表明, 小麦抽穗扬花期的降雨量是赤霉病发生程度的决定性因素; 与秸秆不还田相比, 短期秸秆还田对赤霉病的发生并未表现出明显加重趋势; 在赤霉病重发生年份, 棘孢木霉和解淀粉芽孢杆菌组合可明显减轻赤霉病的发生。

关键词 秸秆还田; 秸秆腐熟剂; 赤霉病

中图分类号 S435.121.4⁺5 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)05-0132-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.05.033

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Straw Decomposing Agent on Occurrence of Wheat Fusarium Head Blight in Rice-Wheat Rotation Field

YANG Li-jun¹, YANG Ze-fu², ZHANG Jun-hua² et al (1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences / Key Lab of Fertilizer Utilization of Waste, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crop in Central China, Wuhan, Hubei 430064; 2. Yicheng Agricultural and Rural Bureau, Yicheng, Hubei 441400)

Abstract A short-term positioning test field of straw returning in rice wheat rotation mode was selected and the straw was treated with straw ripening agent made of four different microbial bacteria including *Trichoderma echinospora*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus Niger* and *Penicillium* combined with *Bacillus subtilis* from 2016 to 2019. The disease of wheat scab treated with different straw ripening agents was investigated in 2018 and 2019, respectively. The results showed that the rainfall in the period of heading and flowering of wheat was the key factor. Compared with no straw returning, straw returning had no significant effect on the occurrence of FHB. The combination of *Trichoderma echinosporum* and *Bacillus amyloliquefaciens* could reduce the occurrence of FHB to a certain extent in the year of serious occurrence.

Key words Straw returning; Straw decomposing agent; Fusarium head blight

随着国家禁秸秆焚烧令和的实施, 进行全量还田是秸秆处理和再利用最有效的途径^[1]。研究认为, 秸秆直接还田具有增加土壤养分、改善土壤结构、增强土壤微生物活性等优点^[2]。然而, 也有学者认为, 秸秆还田不当会造成后茬作物出苗率和分蘖率降低, 造成一些土传性病害和钻蛀性虫害加重, 以及增加温室气体排放等不良影响^[3-6]。在南方稻-麦轮作区, 麦收后至下季水稻插秧, 或者是水稻收后至下季小麦播种的时间间隔仅为20d左右, 因茬口问题抢时间, 直接还田的秸秆在短时间内很难完全自然腐解, 生产上往往通过施用秸秆腐熟剂来加速秸秆分解。

目前生产上应用较广的秸秆腐熟剂微生物来源主要是木霉、曲霉、根霉、青霉、枯草芽孢杆菌^[7]。木霉菌可通过竞争、重寄生和分泌次生代谢产物等方式抑制多种植物病原菌的生长, 因其具有来源广、氮化和分解秸秆纤维素能力强、生长速度快、便于工业化生产等优点而被广泛利用, 是目前生产上利用最多、且被公认为是普遍存在并具有重要经济意义的生防菌^[8]。棘孢木霉是木霉的一个新种, 除具有较好秸秆降解能力^[9], 还对土传病害如黄瓜枯萎病、番茄枯萎病和水稻纹枯病具有一定的防治效果^[10-11]; 其主要机制在于棘孢木霉通过生长竞争减小立枯丝核菌的生存空间, 同时通过释放代谢抗生作用的化学物质, 抑制立枯丝核菌萌发和菌丝生长^[12-15]。青霉菌和曲霉属真菌作为秸秆

腐熟剂的微生物元素, 主要是利用这些真菌具有土壤解磷作用, 能将土壤中难溶的磷肥溶解, 变成可溶的磷酸盐成分, 为植物提供丰富的磷元素^[16]。枯草芽孢杆菌可在芽孢形成初期分泌多种抗菌物质, 对纹枯病、枯萎病、根腐病、赤霉病多种病原菌具有特异性的防治作用, 且目前我国已成功开发出百抗、麦丰宁、纹曲宁、亚宝等多种商品制剂在生产上防治植物病害^[17]。

赤霉病是我国长江中下游地区小麦生产上最重要病害。随着气候变化和农业废弃物秸秆还田等耕作制度的改变, 赤霉病在我国华北、黄淮和西北等广大麦区有逐年加重趋势^[18-19]。稻桩和残茬秸秆上形成的子囊壳释放的子囊孢子是我国南方稻麦轮作区赤霉病初侵染的主要来源^[20]。若采用秸秆腐熟剂将前茬作物秸秆加快腐熟并通过生防菌竞争抑制, 则有可能通过减少赤霉病菌子囊壳赖以形成的秸秆基质载体, 从而减轻赤霉病的发生。基于此, 笔者探讨了连续施用4种不同微生物菌种组合的秸秆腐熟剂对小麦赤霉病发生情况的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验地点位于湖北省宜城市小河镇石灰村(112°9'38.6"E, 31°42'0.9"N), 常年稻-麦轮作, 土壤有机质、碱解氮含量中等, 速效磷、速效钾含量较低。

1.2 试验设计 在水稻或者小麦收获后分别进行秸秆全量还田并施用不同秸秆腐熟剂组合, 即在小麦收获时, 将秸秆就地粉碎全量还田, 然后施用腐熟剂, 再正常灌水旋耕种植水稻; 于水稻收获时, 将其秸秆就地粉碎全量还田, 亦经腐熟剂处理, 整地播种下一季冬小麦。如此终年循环, 从2016年

基金项目 湖北省科技研发项目(2018ABA097); 湖北省农业科学院重大成果培育项目(2017CGPY01)。

作者简介 杨立军(1974—), 男, 湖北天门人, 研究员, 博士, 从事小麦病害防控技术研究。

收稿日期 2021-10-22

麦收后开始第一次施用秸秆腐熟剂,一直持续到 2019 年水稻收获,共进行 4 个稻-麦生长季节。其中小麦生长季为 10 中下旬至翌年 5 月下旬,水稻生长季为 6 月上旬至 9 月下旬,种植的小麦品种为感赤霉病品种衡观 35,水稻品种为泰优 398。

采取固定田块、固定面积、固定施用腐熟剂、固定秸秆还田、固定耕作方式进行,共设置 6 个处理(表 1),即 4 个秸秆腐熟剂处理(秸秆全量还田+4 种不同菌剂组合),1 个阴性对照(秸秆人工移出,不施秸秆腐熟剂),1 个阳性对照(秸秆全量还田,不施秸秆腐熟剂)。每个处理 50 m×15 m,处理之

间周围筑 0.5 m 埂隔开。对于阴性对照处理,小麦或水稻均采用人工方式齐地表收割,并将秸秆全部移除田外;对于秸秆还田且施不同秸秆腐熟剂处理,先采用联合收割机进行小麦或水稻收割并粉碎成 20 cm 左右小段后,人工均匀撒施秸秆腐熟剂于秸秆表面后,再用旋耕机连同秸秆翻入土中。

水稻或小麦生长季节,所有试验均按 N 105 kg/hm², P₂O₅ 112.5 kg/hm², K₂O 112.5 kg/hm² 进行基施;其余田间管理均按当地大田生产实际进行,其中小麦季于分蘖期喷施 20% 氟氯吡氧乙酸乳油(美国陶氏益农)525 mL/hm² 除草,之后当季小麦不再施用任何其他化学药剂。

表 1 稻-麦轮作秸秆还田施用秸秆腐熟剂处理

Table 1 Treatment of crops straw return to the field and applying straw returning agent in rice and wheat rotation system

处理 Treatment	成分 Component	剂型 Formulation	微生物菌量//×10 ¹⁰ Microbial content	用量 Usage//kg/hm ²
T1	棘孢木霉/枯草芽孢杆菌	粉剂	50	60
T2	黑曲霉/枯草芽孢杆菌	粉剂	50	60
T3	黑根霉/枯草芽孢杆菌	粉剂	50	60
T4	青霉/枯草芽孢杆菌	粉剂	50 </td <td>60</td>	60
T5(阳性对照)Positive control	—(秸秆还田)	—	—	—
T6(阴性对照)Negative control	—(秸秆不还田)	—	—	—

1.3 小麦赤霉病调查 于 2018、2019 年分别进行小麦赤霉病调查。即在小麦灌浆后期至乳熟期(2018 年为 5 月 6 日,2019 年为 5 月 12 日),按 0~9 级分级标准^[21],对每个处理进行赤霉病病情调查。考虑到是大区试验,以及赤霉病的发生一般较为均匀、不存在明显发病中心的特点,在调查时将每个处理大区平均划分为 3 个小区,作为 3 次重复,对每个小区采取 5 点法取样,每点调查 0.5 m×0.5 m 铁丝框内小麦植株所有穗头的赤霉病病情,记录各级病穗数,计算病穗率、病情指数。其中,病穗率=病穗数/调查总穗数×100%;病情指数= $\sum(\text{各级病穗数} \times \text{相应级数值}) / (\text{调查总穗数} \times \text{最高级数值}) \times 100$ 。

1.4 数据处理 采用 Microsoft Excel 2013 软件对试验数据进行计算,采用 SPSS 19.0 软件的 Duncan's 新复极差法进行各处理间方差和差异显著性分析。

1.5 花期气象资料分析 从宜城市气象局获取 2018 和 2019 年 4 月的日均温(°C)和日降雨量(mm)等气象资料数据,以用于分析当年赤霉病流行程度。

2 结果与分析

2.1 小麦抽穗扬花期气象资料分析 根据往年小麦生长规律,宜城小麦一般抽穗期在 4 月上旬,扬花期在 4 月上中旬,灌浆期在 4 月中下旬。气象资料显示,在气温方面,2018 年 4 月最低气温 8.1 °C,最高气温 25.3 °C,平均气温 18.0 °C;2019 年最低气温 9.6 °C,最高气温 25.4 °C,平均气温 19.3 °C,2 年气温差别不大,都没有出现极端低温或高温天气(图 1)。在降雨方面,2018 年有 3 次明显的降水过程,第一次为 4 月 5 日,降水量 23.1 mm,此时小麦正处于抽穗期;第二次为 4 月 12—14 日,3 d 的降雨量分别为 13.5、12.7 和 0.4 mm,此时小麦正处于扬花期;第三次为 4 月 20—23 日,4 d 的降雨量分别为 0.9、0.2、23.7 和 9.7 mm,此时小麦处于

灌浆期(图 2)。2019 年只有 2 次较小的降雨过程,第一次为 4 月 2—3 日,2 d 分别降雨 0.6 和 1.0 mm,此时小麦处于抽穗初期;第二次为 4 月 10 日,降雨量 1.5 mm,此时小麦处于扬花初期。

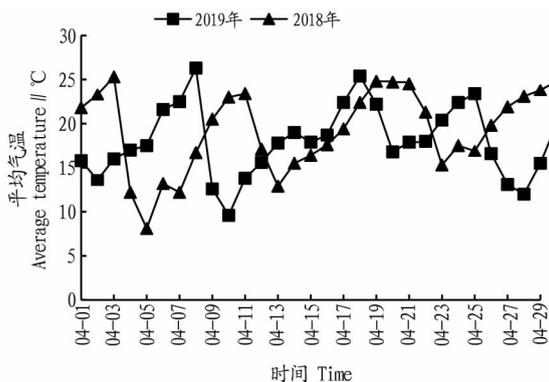


图 1 宜城市 2018 和 2019 年 4 月平均温度

Fig. 1 Average temperature of Yicheng in April 2018 and 2019

2.2 不同秸秆腐熟剂处理对赤霉病发生的影响 整体而言,2018 年小麦抽穗扬花期降雨量较多,温度适宜,赤霉病发生较重,各处理的病穗率为 46.7%~68.3%,病情指数为 26.8~48.9;2019 年小麦抽穗—扬花期雨水较少,不利于赤霉病的发生,赤霉病发生明显偏轻,赤霉病病穗率为 11.1%~14.4%,病情指数为 2.9~4.2(表 2)。2 个年度的阳性对照(秸秆还田,T5)与阴性对照(秸秆不还田处理,T6)的赤霉病发病率和病情指数之间均无显著差异($P>0.05$),表明连续秸秆还田对赤霉病发生无明显影响;对于各秸秆腐熟剂处理,2018 年的棘孢木霉/枯草芽孢杆菌组合腐熟剂处理(T1)的病穗率和病情指数最低,且显著低于该年度其他各处理病穗率和病情指数($P<0.05$),其次为黑曲霉/枯草芽孢杆

菌组合秸秆腐熟剂(T2),其病指指数也显著低于秸秆还田但不加腐熟剂处理(T5);2019年,各处理之间病穗率和病情指数无显著差异($P>0.05$)(表2)。

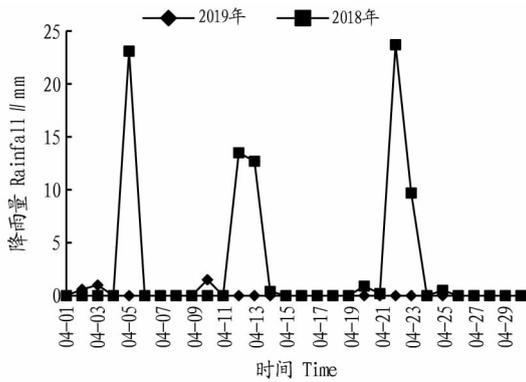


图2 宜城市2018和2019年4月降水量

Fig. 2 Rainfall of Yicheng in April 2018 and 2019

3 结论与讨论

该研究结果表明,小麦抽穗扬花期的降雨量是赤霉病发生程度的决定性因素;与秸秆不还田相比,短期秸秆还田对赤霉病的发生没有明显影响;棘孢木霉菌与芽孢杆菌组配在赤霉病重发生年份可明显减轻赤霉病发生。

赤霉病是一种典型的气候性病害,其发生程度与小麦抽穗扬花期的降雨量和气温密切相关^[22-23]。研究表明,在小麦抽穗扬花期,只要日平均温度高于15℃,稻茬和前茬残留秸秆上形成的子囊壳孢子就会逐渐成熟并向外弹射,若此期间有连续2~3d的雨水天气,子囊壳释放的子囊孢子便会借助雨水向空气弹射,成功侵染麦穗^[19]。与2019年相比,2018年上中旬有2次重要降水过程,该降雨过程正好与小麦抽穗扬花期吻合,因而这一年赤霉病整体发生较重,而2019年只有2次轻微的降雨过程,且小麦尚处于孕抽穗时期,因而尽管温度适合但整体赤霉病发生较轻。

表2 不同秸秆腐熟剂处理的小麦赤霉病病情调查结果

Table 2 Investigation results of wheat scab under different treatments of straw composting agents

处理 Treatment	成分 Component	2018年		2019年	
		病穗率 Diseased spike rate//%	病情指数 Diseased index	病穗率 Diseased spike rate//%	病情指数 Disease index
T1	棘孢木霉/枯草芽孢杆菌	46.7 a	26.8 a	11.1 a	2.9 a
T2	黑曲霉/枯草芽孢杆菌	57.8 b	36.7 b	14.4 a	4.1 a
T3	黑根霉/枯草芽孢杆菌	59.2 b	41.7 bc	11.7 a	3.5 a
T4	青霉/枯草芽孢杆菌	67.0 c	45.1 c	11.2 a	3.9 a
T5(阳性对照) Positive control	—(秸秆还田)	64.1 bc	45.8 c	13.1 a	4.2 a
T6(阴性对照) Negative control	—(秸秆不还田)	68.3 c	48.9 c	11.4 a	3.9 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

关于秸秆还田对小麦赤霉病的影响,国内鲜有报道。仅乔玉强等^[24]研究秸秆还田与施肥量对赤霉病发生的影响,结果显示,秸秆还田处理的赤霉病病穗率、病情指数分别为2.7%~11.1%、2.3~7.8,而秸秆不还田分别为4.2%~7.9%、3.0~6.2,秸秆还田一定程度上加重该病的危害,且随着氮肥施用量的增加,病穗率和病情指数亦有增加趋势。该研究2年结果均显示,秸秆还田但不施秸秆腐熟剂阳性对照(T5)和秸秆不还田的阴性对照(T6)之间差异并不显著($P>0.5$),表明短期连续秸秆还田对赤霉病发生无明显影响。

赤霉病是由镰刀菌引起的一种营腐生的气候性病害,其病原菌主要在稻茬和残茬秸秆上,同时也在土壤中营腐生生存,秸秆腐熟一定程度上可减少病原菌寄腐生场所^[22]。该研究结果显示,在赤霉病重发生年份,加秸秆腐熟剂处理的病穗率和病情指数均较不加秸秆腐熟剂低,这可能是加入秸秆腐熟剂的枯草芽孢杆菌具有较强的定殖、竞争以及分泌抗菌物质抑制病原菌生长,或者加入的秸秆腐熟剂的菌一定程度影响了土壤微生物的组成和结构。胡洪涛等^[25]在该试验相同田块取样,分析秸秆腐熟剂对稻麦轮作区土壤微生态的影响,结果发现,应用秸秆腐熟剂的土壤其真菌多样性、组成和丰度均发生显著变化,也证实施用的秸秆腐熟剂菌能一定

程度影响土壤微生物的组成和结构。此外,在几种不同菌与枯草芽孢杆菌组合制成的秸秆腐熟剂中,仅棘孢木霉和枯草芽孢杆菌复合菌腐熟剂对赤霉病防治效果最明显,且明显高于根霉、黑曲霉以及青霉,可能是木霉菌在土壤中较根霉、曲霉和青霉具有更大的繁殖能力和占位优势。其原因尚需深入研究。

参考文献

- [1] 石祖梁,王飞,王久臣,等.我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J].中国农业科技导报,2019,21(5):8-16.
- [2] 曾宪楠,高斯侗,冯延江,等.水稻秸秆还田对土壤培肥及水稻产量的影响研究进展[J].江苏农业科学,2018,46(18):13-16.
- [3] 常志州,王德建,杨四军,等.对稻麦秸秆还田问题的思考[J].江苏农业学报,2014,30(2):304-309.
- [4] 逯非,王效科,韩冰,等.稻田秸秆还田:土壤固碳与甲烷减排[J].应用生态学报,2010,21(1):99-108.
- [5] 马二登,马静,徐华,等.秸秆还田方式对麦田N₂O排放的影响[J].土壤,2007,39(6):870-873.
- [6] 王汉朋.秸秆还田对玉米纹枯病发生及流行的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [7] 韩梦颖,王雨桐,高丽,等.降解秸秆微生物及秸秆腐熟剂的研究进展[J].南方农业学报,2017,48(6):1024-1030.
- [8] 刘敏君.木霉H18-1-1菌株和解磷青霉QM-6菌株对小麦防病及促生效果分析[D].泰安:山东农业大学,2018.
- [9] 秦雪丽.水稻秸秆快速降解的应用基础研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [10] 贺字典.河北省蔬菜保护地木霉菌种群动态及抗逆木霉生防菌株筛选[D].沈阳:沈阳农业大学,2010.

(下转第169页)

总脂肪酸的 1.4%, DHA 含量占总脂肪酸的 34.3%。

从表 3 可以看出,原位甲酯法虽然 EPA、DHA 产量稍低于 Bligh-Dyer 甲酯法,但 DHA 含量与文献的研究结果接近^[15-17],且分析步骤相对简单,所用化学试剂较少,也不失为一种筛选高产 DHA 海洋微藻的脂肪酸快速分析方法。

表 3 原位甲酯法和 Bligh-Dyer 甲酯法提取的裂殖壶藻 EPA 和 DHA 含量对比

方法 Method	EPA	DHA
原位甲酯法 In-situ methylester method	2.01	97.74
Bligh-Dyer 甲酯法 Bligh-Dyer methylester method	4.98	100.55

3 结论

通过单因素和正交试验考察原位甲酯法分析裂殖壶菌粉脂肪酸的影响因素,4 个主要因素的主次顺序依次为浸提温度、料液比、硫酸浓度、BHT 用量。试验较佳的分析条件为料液比 1:20、硫酸浓度 3.5%、浸提温度 80 °C、BHT 用量 20 mg。通过与 Bligh-Dyer 甲酯法验证对比,在脂肪酸甲酯组成上 2 种方法没有明显差别。相对于 Bligh-Dyer 甲酯法,原位甲酯法因消耗溶剂少、操作简单,更适合应用于筛选高产 EPA 和 DHA 藻株的脂肪酸分析法。

参考文献

- [1] 秦薇. 二十二碳六烯酸对人胰腺癌细胞生长抑制的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- [2] 肖玫, 欧志强. 深海鱼油中两种脂肪酸(EPA 和 DHA)的生理功效及机理的研究进展[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 522-526.
- [3] NAUROTH J M, LIU Y C, VAN ELSWYK M, et al. Docosahexaenoic acid

(DHA) and docosapentaenoic acid (DPA-n-6) algal oils reduce inflammatory mediators in human peripheral mononuclear cells *in vitro* and paw edema *in vivo*[J]. *Lipids*, 2010, 45(5): 375-384.

- [4] 章莹颖, 邓春芳, 崔岩, 等. 不同方法对微藻细胞破碎及油脂提取效果的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(3): 61-65.
- [5] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. *Can J Biochem Physiol*, 1959, 37(8): 911-917.
- [6] 张雨倩, 张婧嫣, 杨淑媛, 等. 海洋微藻藻油的提取工艺研究[J]. 食品工程, 2016(1): 56-58.
- [7] 何文胜, 王灿, 杨诗颖. 裂殖壶菌菌株 FJU-512 油脂提取的细胞破壁工艺[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 606-610.
- [8] 郑天翔, 王丽娟, 任晓霞, 等. 响应面优化提取小球藻油脂及其脂肪酸成分分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 115-121, 129.
- [9] 刘艺琳, 陈弘培, 龚世禹, 等. 微藻油的提取与功能研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 333-337, 342.
- [10] 叶青, 吴子健, 侯惠静, 等. 两株小球藻培养基的优化及其产 EPA 性能的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(8): 192-198.
- [11] 李翔宇, 田勇, 陆姝欢, 等. 响应面试验优化藻类来源磷脂型 DHA 的提取工艺[J]. 中国油脂, 2017, 42(4): 118-122.
- [12] 李登红, 栗晖, 姚志湘, 等. 植物油中 3 种抗氧化剂的同时快速分析[J]. 分析实验室, 2016, 35(1): 61-65.
- [13] ARAUJO P, NGUYEN T T, FRØYLAND L, et al. Evaluation of a rapid method for the quantitative analysis of fatty acids in various matrices[J]. *J Chromatogr A*, 2008, 1212(1/2): 106-113.
- [14] 康晶, 郑志永, 詹晓北, 等. 氮源和溶氧限制对裂殖壶菌 *Schizochytrium limacinum* SR21 合成二十二碳六烯酸的影响[J]. 工业微生物, 2013, 43(2): 58-63.
- [15] BÁRCENAS-PÉREZ D, LUKEŠ M, HROUZEK P, et al. A biorefinery approach to obtain docosahexaenoic acid and docosapentaenoic acid n-6 from *Schizochytrium* using high performance countercurrent chromatography[J/OL]. *Algal Res*, 2021, 55 [2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102241>.
- [16] WANG H C, KLINTHONG W, YANG Y H, et al. Continuous extraction of lipids from *Schizochytrium* sp. by CO₂-expanded ethanol[J]. *Bioresour Technol*, 2015, 189: 162-168.
- [17] ZINNAI A, SANMARTIN C, TAGLIERI I, et al. Supercritical fluid extraction from microalgae with high content of LC-PUFAs. A case of study: Sc-CO₂ oil extraction from *Schizochytrium* sp[J]. *J Supercrit Fluids*, 2016, 116: 126-131.

(上接第 134 页)

- [11] SANT D, CASANOVA E, SEGARRA G, et al. Effect of *Trichoderma asperellum* strain T34 on Fusarium wilt and water usage in carnation grown on compost-based growth medium[J]. *Biological control*, 2010, 53(3): 291-296.
- [12] 陈立华, 金秋, 牛明, 等. 棘孢木霉对水稻纹枯病病原菌立枯丝核菌生物防治的研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 115-117.
- [13] 夏伟, 张红, 颜艳伟, 等. 棘孢木霉 I4 对立枯丝核菌的拮抗机制[J]. 植物保护学报, 2010, 37(5): 477-478.
- [14] 杨萍, 杨谦, 许倩. 棘孢木霉生物防治相关代谢产物研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(1): 36-40.
- [15] 张眉, 吴斌, 徐德坤, 等. 棘孢木霉 JM-1 菌株对麦根腐离蠕孢的拮抗机制[J]. 山东农业科学, 2019, 51(3): 92-96.
- [16] 林启美, 赵小蓉, 孙焱鑫, 等. 四种不同生态系统的土壤解磷细菌数量及种群分布[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 34-37.
- [17] 王晓阁. 枯草芽孢杆菌研究进展与展望[J]. 中山大学研究生学刊(自

然科学、医学版), 2012, 33(3): 14-23.

- [18] 陈怀谷. 小麦赤霉病综合防控技术[J]. 农村新技术, 2019(1): 23.
- [19] 马忠华, 陈云, 尹燕妮. 小麦赤霉病流行成灾原因分析及防控对策探讨[J]. 中国科学基金, 2020, 34(4): 464-469.
- [20] 刘红军, 侯青松. 小麦赤霉病的发生发展及抗赤资源利用[J]. 小麦研究, 2014, 35(1): 11-17.
- [21] 中华人民共和国农业部. 农药田间药效试验准则 第 15 部分 杀菌剂防治小麦赤霉病: NY/T 1464. 15—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [22] 陈文华, 殷宪超, 武德亮, 等. 小麦赤霉病生物防治研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(4): 12-18.
- [23] 张春云. 小麦赤霉病发生与菌源·气象因子量关系分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(6): 151-153, 156.
- [24] 乔玉强, 曹承富, 赵竹, 等. 秸秆还田与施氮量对小麦产量和品质及赤霉病发生的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(4): 727-731.
- [25] 胡洪涛, 曹春霞, 闵勇, 等. 秸秆腐熟剂对稻麦轮作区土壤微生物生态的影响[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(6): 51-63.