



颜宇, 李进耀, 张广杰, 艾合买提江·买买提, 孟卓, 徐安东, 付娆, 杨文娟, 马德英. 白星花金龟虫砂缓解氟啶草酮与二甲戊灵对小麦残留药害及增产效果研究 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 521–530. YAN Yu, LI Jin-Yao, ZHANG Guang-Jie, Aihemaitijiang MAIMAITI, MENG Zhuo, XU An-Dong, FU Rao, YANG Wen-Juan, MA De-Ying. Mitigation of fluridone and pendimethalin residual phytotoxicity and yield-enhancing on wheat by *Protaetia brevitarsis* frass [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 521–530.

白星花金龟虫砂缓解氟啶草酮与二甲戊灵对小麦残留药害及增产效果研究

颜宇¹, 李进耀¹, 张广杰¹, 艾合买提江·买买提², 孟卓¹, 徐安东¹,
付娆¹, 杨文娟², 马德英^{1*}

(1. 新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆维吾尔自治区农药检定所, 乌鲁木齐 830049)

摘要:【目的】为探究白星花金龟虫砂、生物炭、粉煤灰复配微生物菌剂及腐植酸缓解棉田常用除草剂氟啶草酮与二甲戊灵对小麦残留药害及增产效果。【方法】采用田间小区试验, 设计虫砂 (1 500 kg/hm², L100)、生物炭 (300 kg/hm², C40)、粉煤灰 (6 000 kg/hm², F400) 3种吸附剂分别复配菌剂十二菌医 (SEJ)、菌淋田下 (JLT) 及腐植酸 (FZS), 与未进行土壤改良的对照组 (CK) 比较小麦的株高、茎粗、叶绿素含量、药害指数以及产量差异。【结果】结果显示, 与CK相比, 在拔节期, JLT组的株高最高, 显著高出CK 14.24%; L100+SEJ处理组的株高增加11.78%。在扬花期, L100的茎粗最大, 较CK显著增加8.63%。叶绿素含量方面, L100的SPAD值最高, 较CK增加14.36%; L100+SEJ的叶绿素SPAD值其次, 比CK显著增加12.00%。在药害缓解效果上, L100+SEJ处理组的药害指数在苗期和拔节期相比CK分别显著降低81.95%和89.52%, 药害缓解效果显著。整体来看, 虫砂处理在小麦茎粗、叶绿素含量和药害指数方面优于生物炭和粉煤灰。在产量方面, L100+SEJ处理产量最高, 较CK显著增加31.20%, 穗数增加18.16%; 穗长增加16.76%, 穗粒数增加3.08%, 其产量构成要素均表现较优。【结论】整体而言, 虫砂作为吸附剂的处理在株高、茎粗、叶绿素含量及产量方面均表现出较好的效果, 优于生物炭和粉煤灰。本试验中1 500 kg/hm²虫砂+150 kg/hm²十二菌医为缓解小麦药害的最优处理组合。

关键词: 白星花金龟虫砂; 生物菌剂; 氟啶草酮; 二甲戊灵; 残留药害

中图分类号: Q968.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0521-10

Mitigation of fluridone and pendimethalin residual phytotoxicity and yield-enhancing on wheat by *Protaetia brevitarsis* frass

YAN Yu¹, LI Jin-Yao¹, ZHANG Guang-Jie¹, Aihemaitijiang MAIMAITI², MENG Zhuo¹, XU An-Dong¹, FU Rao¹, YANG Wen-Juan², MA De-Ying^{1*} (1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Pesticide Inspection Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830049, China)

Abstract: 【Aim】 This study aimed to evaluate the effects of *Protaetia brevitarsis* frass, biochar, and fly ash compounded with microbial inoculants or humic acid on mitigating residual phytotoxicity of commonly used cotton field herbicides fluridone and pendimethalin on wheat and on wheat yield enhancement. 【Methods】 A field plot experiment was conducted using three adsorbent materials: *Protaetia brevitarsis* frass (1 500 kg/hm², L100), biochar (300 kg/hm², C40), and fly ash (6,000 kg/hm², F400). These materials were compounded with Shi'er Junyi (SEJ), Junlin Tianxia (JLT), and humic acid (FZS), respectively. An

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2022B02046); 天山英才计划第三期培养计划项目

作者简介: 颜宇, 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, E-mail: 844060928@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 马德英, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为有害生物绿色防控, E-mail: mdyxnd@163.com

收稿日期 Received: 2024-09-27; 修回日期 Revision received: 2025-08-15; 接受日期 Accepted: 2025-08-19

untreated control without soil amendment (CK) was included. Wheat plant height, stem diameter, chlorophyll content (SPAD value), phytotoxicity index, and yield were determined and compared among treatments. **【Results】** At the jointing stage, the JLT treatment resulted in the greatest plant height, which was significantly higher than that of CK by 14.24%, while the L100 + SEJ treatment increased plant height by 11.78%. During the flowering stage, stem diameter was largest under the L100 treatment and was significantly increased by 8.63% compared with CK. Regarding chlorophyll content, the L100 treatment exhibited the highest SPAD value, which was 14.36% higher than that of CK, followed by the L100 + SEJ treatment with a significant increase of 12.00%. In terms of phytotoxicity mitigation, the phytotoxicity index under the L100 + SEJ treatment was significantly reduced by 81.95% at the seedling stage and by 89.52% at the jointing stage compared with CK, indicating a significant mitigation effect. Overall, *Protaetia brevitarsis* frass treatments were superior to biochar and fly ash in improving stem diameter, chlorophyll content, and phytotoxicity index. Yield analysis showed that the L100 + SEJ treatment achieved the highest grain yield, which was significantly increased by 31.20% compared with CK. In addition, the number of spikes, spike length, and grains per spike were increased by 18.16%, 16.76%, and 3.08%, respectively, with all yield components performing well. **【Conclusion】** Among the tested adsorbents, *Protaetia brevitarsis* frass demonstrated the most effective performance in promoting plant height, stem diameter, chlorophyll content, and yield compared to biochar and fly ash. Under the conditions of this study, the combined application of 1,500 kg/hm² *Protaetia brevitarsis* frass with 150 kg/hm² Shi'er Junyi was identified as the optimal treatment combination for mitigating phytotoxicity in wheat.

Key words: *Protaetia brevitarsis* frass; microbial inoculant; fluridone; pendimethalin; residual phytotoxicity

棉花是新疆的重要经济作物,近年来新疆棉花产量占全国棉花总产量的90%左右(陈佳等,2022)。随着新疆生产粮食的任务逐年增加,大面积棉田需要改种小麦、玉米等粮食作物。氟啶草酮(商品名:龙草净)与二甲戊灵是新疆棉田常用的土壤封闭除草剂,这两种除草剂对棉花安全性好且对多种恶性杂草龙葵、藜等具有良好的防除效果,但由于残留时间长、难降解等问题,对棉田后茬作物如小麦、玉米的生长发育影响较大(张广杰,2022)。白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* Lewis 是鞘翅目 Coleoptera 花金龟科 Cetoniidae 星花金龟属 *Protaetia* 的昆虫(马文珍,1995),其幼虫具食腐性且取食量大,可高效转化食畜禽粪便、食用菌菌糠和作物秸秆等农牧有机废弃物为虫砂有机肥(李潘潘,2021)。白星花金龟幼虫虫砂呈长椭圆型颗粒状,形似黑大米,具有体积小、形状稳定、富含腐殖质和营养元素等特点,此外虫砂复合生防菌还田模式可助力棉花黄萎病绿色防控和棉花产业的可持续发展(张广杰,2022)。因此,探究白星花金龟虫砂在缓解棉田除草剂残留对后茬小麦药害方面的作用,对于促进新疆粮食与棉花产业的可持续发展具有重要意义。

白星花金龟幼虫取食秸秆、腐叶产生的虫砂

清洁、安全,且颗粒均匀,富含腐殖酸、多糖、蛋白质、氨基酸及各种营养成分,有机质、氮磷钾的含量是标准有机肥(NY525-2021,NPK≥4%)的2倍(张广杰,2022)。史长旭等(2021)将不同比例的虫砂添加到辣椒、黄瓜育苗基质中,发现处理组辣椒、黄瓜幼苗的叶绿素、生长形态指标以及壮苗指数均显著高于对照组。张广杰等(2020)对小白菜施用不同量的白星花金龟幼虫虫砂,发现在一定范围内,小白菜地上高度、根系深度、鲜重与虫砂的添加量成正比。杨小洁等(2022)研究发现,白星花金龟幼虫虫砂还田有效减少土壤养分流失的同时提高土壤速效养分含量;此外,白星花金龟虫砂还田处理烟苗的叶片数、株高以及叶长均显著高于对照。高顺平等(2023)认为虫砂中潜在的微生物群落能改善土壤环境,进而提高植物抗病性。

已有研究表明,生物炭、粉煤灰可作为吸附剂,如不同量的生物炭可以缓解甲磺草胺对小麦的药害并且促进小麦生长(Wang *et al.*, 2022);生物炭的添加可促进3种三嗪类除草剂的降解(Liu *et al.*, 2023);粉煤灰对莠去津有较强的吸附力,可以作为低成本吸附剂解决药害问题(Singh *et al.*, 2009)。微生物也常用于降解土壤中的农药

残留,微生物复合菌剂可以有效缓解二氯喹啉酸对烟草的药害(杨森等,2018);从活性污泥中分离出的枯草芽孢杆菌可有效降解二甲戊灵(Ni *et al.*, 2016)。腐植酸同样有助于缓解药害,添加腐植酸可加速除草剂的降解时间,缓解除草剂对小麦的毒性(Iwaniuk *et al.*, 2023)。而关于白星花金龟幼虫虫砂缓解药害的研究尚未见报道。本研究选用白星花金龟幼虫虫砂作为吸附剂,探究虫砂及其他常用吸附剂在与微生物菌剂复配施用时对棉田除草剂氟啶草酮与二甲戊灵对后茬小麦药害的缓解效果及增产作用,明确虫砂生物菌肥的最佳配比,为解决新疆棉麦轮作田残留除草剂的药害问题及虫砂有机肥的开发应用提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试小麦品种为新春44号;除草剂为42%氟啶草酮悬浮剂和33%二甲戊灵乳油。试验用叶绿素仪(TYS-B,浙江托普云农科技股份有限公司);电子天平、游标卡尺、卷尺为基地提供。

吸附剂为白星花金龟虫砂(自养,有机质含量为54.8%、氮磷钾含量为9.04%)、生物炭(新疆格莱美特有限公司)和粉煤灰;降解菌剂为十二菌医(液体,有效活菌数 ≥ 2 亿/mL,以枯草芽孢杆菌为主,阿托菲纳化学公司,亩推荐剂量10~15 kg)和菌淋田下(粉剂,有效活菌数 $\geq 1 200$ 亿/g,以巨大芽孢杆菌为主,北京航天恒丰科技股份有限公司,亩推荐剂量400 g);以及腐植酸(新疆心连心能源化工有限公司)。

1.2 试验方法

试验于2023年4月6日在昌吉州玛纳斯县冬麦地农田($86^{\circ} 23' 30.192'' E$, $44^{\circ} 19' 5.952'' N$)进行,该农田2022年种植棉花并于播种前施用252 g a.i/hm²氟啶草酮复配990 g a.i/hm²二甲戊灵。试验设置1 500 kg/hm²虫砂(L100)、300 kg/hm²生物炭(C40)、6 000 kg/hm²粉煤灰(F400)3种吸附剂,复配推荐剂量降解菌剂150 kg/hm²十二菌医(SEJ)、6 kg/hm²菌淋田下(JLT)及3 kg/hm²腐植酸(FZS)。设置1个空白对照(CK),共16个处理(表1),每处理3个重复,各处理名称及缩写如表1所示。

表1 本研究处理名称及缩写

Table 1 Treatment names and abbreviations in this study

序号 Serial number	处理 Treatment	缩写 Abbreviation
1	无任何处理 Untreated control	CK
2	十二菌医 (150 kg/hm ²) Shi'er Junyi	SEJ
3	菌淋田下 (6 kg/hm ²) Junlin Tianxia	JLT
4	腐植酸 (3 kg/hm ²) Humic Acid	FZS
5	虫砂 (1 500 kg/hm ²) Larval frass	L100
6	虫砂 (1 500 kg/hm ²) + 十二菌医 (150 kg/hm ²) Larval frass + Shi'er Junyi	L100+SEJ
7	虫砂 (1 500 kg/hm ²) + 菌淋田下 (6 kg/hm ²) Larval frass + Junlin Tianxia	L100+JLT
8	虫砂 (1 500 kg/hm ²) + 腐植酸 (3 kg/hm ²) Larval frass + Humic Acid	L100+FZS
9	生物炭 (300 kg/hm ²) Biochar	C40
10	生物炭 (300 kg/hm ²) + 十二菌医 (150 kg/hm ²) Biochar + Shi'er Junyi	C40+SEJ
11	生物炭 (300 kg/hm ²) + 菌淋田下 (6 kg/hm ²) Biochar + Junlin Tianxia	C40+JLT
12	生物炭 (300 kg/hm ²) + 腐植酸 (3 kg/hm ²) Biochar + Humic Acid	C40+FZS
13	粉煤灰 (6 000 kg/hm ²) Fly ash	F400
14	粉煤灰 (6 000 kg/hm ²) + 十二菌医 (150 kg/hm ²) Fly ash + Shi'er Junyi	F400+SEJ
15	粉煤灰 (6 000 kg/hm ²) + 菌淋田下 (6 kg/hm ²) Fly ash + Junlin Tianxia	F400+JLT
16	粉煤灰 (6 000 kg/hm ²) + 腐植酸 (3 kg/hm ²) Fly ash + Humic Acid	F400+FZS

采用随机区组设计, 共42个小区。每个小区为3.6 m×5 m区域。相邻小区设置大于1 m宽的隔离行, 小区布置在两供水主管中部滴灌带处, 保证小区供水均匀。播种前划分小区并施用菌肥, 播种使用农户播种机统一播种。播种后在各个小区的同一角插标识牌以划分区域, 并标记各个处理, 以便后续观察记录。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 小麦生长发育及产量情况调查

各处理随机选取1 m²大小区间, 于苗期、拔节期、扬花期调查基本苗数、株高、茎粗与叶绿素SPAD值; 成熟期人工脱粒后测产并考种, 分别统计小麦的穗数、穗长、穗粒数、千粒重与产量。

1.3.2 药害指数调查

小麦出苗后调查受药害的情况, 药害等级参照魏福香等(1992)药害分级标准(表2)。

表2 药害分级表

Table 2 Herbicide phytotoxicity classification

药害分级	分级描述	症状
Rating	Description	Symptom
0	无 None	无药害症状, 作物生长正常。 No phytotoxicity symptoms, normal plant growth.
1	微 Slight	症状轻微, 茎部白化初现。Mild symptoms, initial stem chlorosis observed.
2	小 Mild	轻度药害, 叶面白化面积占10%及以下。Mild damage, leaf chlorotic area ≤10%.
3	中 Moderate	叶面白化面积占10%~50%。 Moderate damage, leaf chlorotic area 10%~50%.
4	大 Severe	叶面白化面积占50%~80%。 Severe damage, leaf chlorotic area 50%~80%.
5	极大 Extreme	叶面白化面积占80%以上, 出现死苗。Leaf chlorotic area >80%, seedling mortality observed.

药害指数 = $\sum(\text{各级病株数} \times \text{级数}) / \text{调查总株数} \times \text{最高级数} \times 100$

1.4 数据处理

运用Microsoft Excel整理数据, 应用SPSS 26.0进行数据分析, 采用Duncan多重比较分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同吸附剂复配生物菌剂对小麦生长发育的影响

2.1.1 不同处理对小麦株高的影响

两个时期各处理组小麦株高均高于CK(图1); 在单施吸附剂(L100、C40、F400)时, JLT处理在拔节期的株高最高, 显著高出CK 14.24%。在与菌剂复配后, 虫砂处理小麦株高高于生物炭与粉煤灰处理, L100+SEJ处理相比CK高出11.78%; 此外, 各吸附剂复配菌剂的效果要优于复配腐植酸, 拔节期L100+SEJ处理株高高于L100+JLT处理。而扬花期则是C40处理的株高最高, 在复配菌剂的处理中, C40+FZS处理的株高优于其他处理, 但并未出现显著性差异。综合来看, 虫砂复配降解菌剂对小麦株高的促进效果优于生物炭或粉煤灰单独处理。

2.1.2 不同处理对小麦茎粗的影响

在拔节期和扬花期, 各处理组的小麦茎粗均大于CK(图2); 在拔节期, JLT的茎粗值最大, 但各组间没有显著性差异。到扬花期, L100茎粗值最大, 高出CK 8.63%。3种吸附剂复配菌剂及腐植酸后对小麦的茎粗均有促进效果, F400+SEJ和L100+JLT处理的茎粗显著高于CK, 分别增加了8.24%和7.06%; 在未复配菌剂的情况下, 虫砂组和生物炭组的茎粗值高于复配菌剂的处理组, 而粉煤灰组中复配JLT处理的小麦茎粗值最大。综上所述, 各处理对小麦茎粗均有促进效果, 单施虫砂的效果最为显著, 且优于单施生物炭及粉煤灰。

2.1.3 不同处理对小麦叶绿素的影响

与CK相比, 各处理SPAD值均有提高(图3), 其中L100提升幅度最大, 为14.36%。在复配相同菌剂的情况下, 虫砂组的叶绿素值均高于生物炭组和粉煤灰组, 最高的为L100+SEJ, 相比CK显著提高12.00%, 且分别高出生物炭组0.32%~6.19%和粉煤灰组2.24%~6.04%。在相同吸附剂复配菌剂SEJ或JLT后, 叶绿素值均高于复配腐植酸(FZS), 其中虫砂组复配SEJ处理的叶绿素值最高。这些结果表明, 白星花金龟幼虫虫砂处理能够显著提高小麦的叶绿素含量, 且提升幅度优于生物炭及粉煤灰。

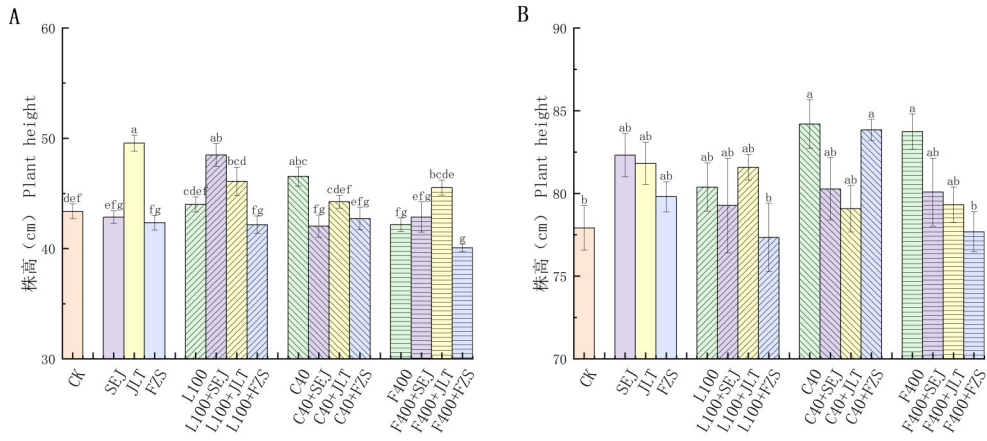


图1 不同处理对棉田下茬作物小麦株高的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on plant height of wheat as the succeeding crop in cotton field

注：A，拔节期；B，扬花期。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。Note: A, Jointing stage; B, Flowering stage. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

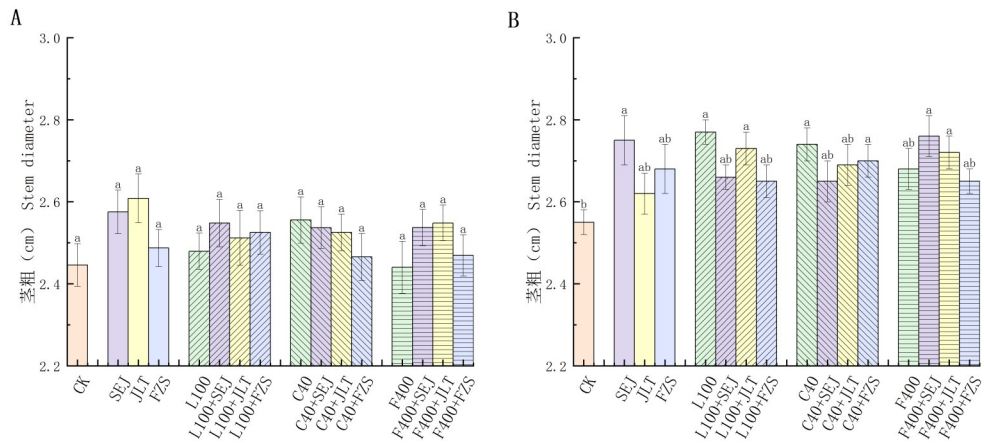


图2 不同处理对棉田下茬作物小麦茎粗的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on stem diameter of wheat as the succeeding crop in cotton field

注：A，拔节期；B，扬花期。Note: A, Jointing stage; B, Flowering stage.

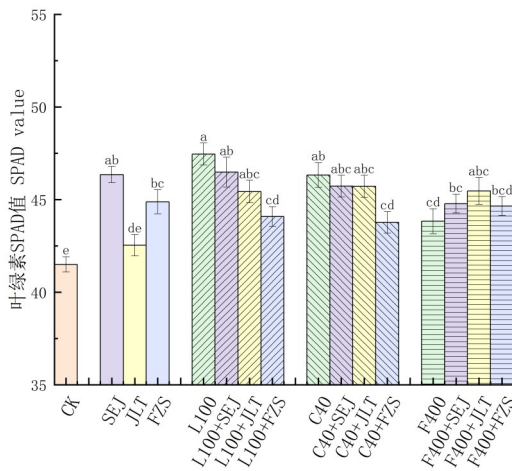


图3 不同处理对棉田下茬作物小麦叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the SPAD value of wheat as the succeeding crop in cotton field

2.2 不同吸附剂复配生物菌剂对小麦药害发生的影响

苗期和拔节期吸附剂单施及吸附剂复配生物菌剂或腐殖酸均能有效缓解小麦的药害 (表3), L100+SEJ处理在两个时期的药害指数均显著低于CK。苗期, L100+SEJ处理的药害指数最低, 相较于CK显著降低81.95%。拔节期, 单施吸附剂时, L100小麦药害指数分别比C40和F400低30.33%、40.38%; 复配相同菌剂时, L100+SEJ的药害指数最低, 比CK显著降低了89.52%, 且低于生物炭组17.78%~74.48%及低于粉煤灰组37.28%~73.38%。综合以上结果, 白星花金龟幼虫虫砂复配十二菌医处理对除草剂药害的缓解效果为所有处理中最优。

表 3 不同处理对棉田下茬作物小麦药害发生的影响

Table 3 Effects of different treatments on herbicide phytotoxicity on wheat as the succeeding crop in cotton field

序号 Serial number	处理 Treatment	药害指数 Herbicide phytotoxicity index	
		苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage
1	CK	1.05 ± 0.14 a	2.05 ± 0.32 a
2	SEJ	0.52 ± 0.27 ab	0.82 ± 0.19 bc
3	JLT	0.79 ± 0.60 ab	1.05 ± 0.54 abc
4	FZS	0.65 ± 0.23 ab	0.83 ± 0.31 bc
5	L100	0.45 ± 0.25 ab	0.62 ± 0.36 bc
6	L100+SEJ	0.11 ± 0.08 b	0.37 ± 0.21 c
7	L100+JLT	0.56 ± 0.30 ab	0.62 ± 0.25 bc
8	L100+FZS	0.75 ± 0.34 ab	1.00 ± 0.37 bc
9	C40	0.67 ± 0.07 ab	0.89 ± 0.09 bc
10	C40+SEJ	0.98 ± 0.05 ab	1.45 ± 0.32 ab
11	C40+JLT	0.48 ± 0.10 ab	0.45 ± 0.10 bc
12	C40+FZS	0.61 ± 0.36 ab	1.18 ± 0.40 abc
13	F400	0.78 ± 0.10 ab	1.04 ± 0.28 abc
14	F400+SEJ	0.70 ± 0.41 ab	1.39 ± 0.39 abc
15	F400+JLT	0.45 ± 0.14 ab	1.03 ± 0.35 abc
16	F400+FZS	0.34 ± 0.15 ab	0.59 ± 0.13 bc

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。Note: Different lowercase letters within the same column indicated significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

表 4 不同处理对棉田下茬作物小麦药害影响的单因素方差分析

Table 4 One-way ANOVA of the effects of different treatments on herbicide phytotoxicity on wheat as succeeding crop in cotton field

		平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
苗期药害指数 Herbicide phytotoxicity index at seedling stage	因素影响 Factor effect	2.462	15	0.164	0.760	0.708
	误差 Error	6.911	32	0.216		
	总和 Total	9.373	47			
拔节期药害指数 Herbicide phytotoxicity index at jointing stage	因素影响 Factor effect	8.052	15	0.537	1.854	0.070
	误差 Error	9.266	32	0.290		
	总和 Total	17.318	47			

2.3 不同吸附剂复配生物菌剂对小麦产量及产量构成要素的影响

各处理对小麦产量及产量构成因素均起到了积极作用 (表 5)。其中, L100+SEJ 处理的小麦产量最高, 达 5 837.30 kg/hm², 较 CK 相比增产

31.2%, 且比生物炭和粉煤灰处理分别高出 4.26%~27.1% 和 19.02%~32.56%。其次为 C40+JLT 处理, 产量为 5 601.47 kg/hm², 同样显著高于 CK, 增幅达到 25.84%, 这两组处理在各项产量构成因素上均表现出较高的水平。

在小麦穗数方面, JLT和L100+SEJ处理的穗数高于其他处理, 相较于CK组分别增加了19.24%和18.16%。穗长与穗粒数最优的为C40+JLT与C40+SEJ处理。千粒重方面各处理组之间并未显示

出显著性差异, 最优处理为F400+FZS, 其次为L100+SEJ, 千粒重分别为42.63 g与41.33 g。因此, 白星花金龟幼虫虫砂复配十二菌医处理对小麦的增产效果最佳。

表5 不同处理对棉田下茬作物小麦产量及产量构成因素的影响

Table 5 Effects of different treatments on yield and yield components of wheat as succeeding crop in cotton field

序号 Serial number	处理 Treatment	基本苗数 (10 ⁴ /hm ²) Basic seedling number	穗数 (10 ⁴ /hm ²) Spike number	穗长 (cm) Spike length	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight	产量 (kg/hm ²) Yield
1	CK	723.67 ± 23.87 d	646.00 ± 5.20 abc	8.62 ± 0.16 bc	23.10 ± 0.85 d	40.00 ± 3.51 a	4 451.22 ± 136.72 c
2	SEJ	800.83 ± 29.66 abcd	697.67 ± 20.61 abc	8.92 ± 0.11 abc	25.30 ± 0.85 abcd	38.13 ± 4.40 a	4 369.18 ± 199.11 c
3	JLT	831.33 ± 29.95 ab	770.33 ± 31.39 a	8.80 ± 0.14 abc	22.97 ± 0.72 d	39.87 ± 3.67 a	4 456.89 ± 397.18 c
4	FZS	808.00 ± 33.66 abcd	650.67 ± 9.56 abc	8.53 ± 0.16 c	26.70 ± 0.99 abc	37.60 ± 4.61 a	4 376.19 ± 261.00 c
5	L100	838.67 ± 44.01 ab	705.33 ± 33.65 abc	9.15 ± 0.12 abc	24.33 ± 0.72 bed	41.33 ± 2.05 a	4 495.91 ± 172.58 c
6	L100+SEJ	843.00 ± 26.49 a	763.33 ± 1.20 a	9.33 ± 0.24 a	26.97 ± 1.13 abc	41.23 ± 3.40 a	5 837.30 ± 313.40 a
7	L100+JLT	821.67 ± 24.34 ab	608.33 ± 46.31 c	9.10 ± 0.15 abc	23.93 ± 0.55 cd	40.70 ± 2.97 a	4 544.94 ± 539.45 c
8	L100+FZS	790.50 ± 13.27 abcd	737.67 ± 16.34 ab	9.12 ± 0.41 abc	22.73 ± 0.96 d	37.03 ± 4.25 a	4 927.80 ± 114.19 abc
9	C40	763.67 ± 14.07 abcd	649.33 ± 22.26 abc	9.02 ± 0.20 abc	24.57 ± 1.04 bcd	39.30 ± 4.43 a	4 593.30 ± 205.88 bc
10	C40+SEJ	769.83 ± 27.66 abcd	762.67 ± 11.29 a	9.31 ± 0.10 a	27.30 ± 1.72 abc	40.83 ± 5.61 a	5 154.58 ± 151.46 abc
11	C40+JLT	733.83 ± 25.89 cd	624.67 ± 38.69 bc	9.30 ± 0.13 a	28.40 ± 1.01 a	38.23 ± 2.40 a	5 601.47 ± 426.72 ab
12	C40+FZS	805.33 ± 9.78 abcd	752.67 ± 27.67 ab	9.10 ± 0.16 abc	27.23 ± 0.98 abc	38.37 ± 3.93 a	4 780.06 ± 280.50 bc
13	F400	815.17 ± 15.46 abc	710.33 ± 9.35 abc	9.24 ± 0.20 ab	27.37 ± 1.13 ab	36.17 ± 1.08 a	4 906.79 ± 398.66 abc
14	F400+SEJ	803.83 ± 27.75 abcd	708.67 ± 32.63 abc	8.85 ± 0.26 abc	22.53 ± 0.60 d	35.80 ± 7.03 a	4 869.10 ± 128.74 abc
15	F400+JLT	789.50 ± 26.49 abcd	710.33 ± 6.12 abc	8.83 ± 0.18 abc	24.70 ± 0.67 bed	40.80 ± 1.94 a	4 405.54 ± 192.62 c
16	F400+FZS	752.33 ± 17.32 bcd	675.67 ± 31.71 abc	8.78 ± 0.16 abc	24.33 ± 0.70 bed	42.63 ± 2.30 a	4 619.31 ± 181.64 bc

表6 不同处理对棉田下茬作物小麦产量及产量构成因影响的单因素方差分析

Table 6 One-way ANOVA of the effects of different treatments on yield and yield components of wheat as succeeding crop in cotton field

	产量及产量指标 Yield and yield indicators	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
基本苗数 Basic seedling number	因素影响 Factor influence	115 802.740	15	7 720.183	1.937	0.031
	误差 Error	318 786.500	80	3 984.831		
	总和 Total	434 589.240	95			
穗数 Spike number	因素影响 Factor effect	119 830.979	15	7 988.732	4.196	0.000
	误差 Error	60 930.000	32	1 904.063		
	总和 Total	180 760.979	47			
穗长 Spike length	因素影响 Factor effect	27.390	15	1.826	1.616	0.066
	误差 Error	524.170	464	1.130		
	总和 Total	551.560	479			
穗粒数 Kernels per spike	因素影响 Factor effect	1 655.325	15	110.355	4.051	0.000
	误差 Error	12 639.267	464	27.240		
	总和 Total	14 294.592	479			
千粒重 Thousand-kernels weight	因素影响 Factor effect	179.353	15	11.957	0.265	0.996
	误差 Error	1 446.127	32	45.191		
	总和 Total	1 625.480	47			
产量 Yield	因素影响 Factor effect	8 597 448.317	15	573 163.221	2.373	0.020
	误差 Error	7 727 758.633	32	241 492.457		
	总和 Total	16 325 206.950	47			

3 结论与讨论

在促进植物生长方面，将白星花金龟虫幼虫虫砂用作有机肥施用于樱桃萝卜、油菜和小白菜等蔬菜作物，能够显著提高作物产量（孙晨可，2018；张广杰，2022）。白星花金龟虫砂有机肥还能促进番茄植株生长发育，提高果实产量和维生素C含量（吴翔等，2019）。这与本研究的结果一致，本研究用白星花金龟虫砂作为吸附剂，并将生物炭和粉煤灰做对比，同时复配微生物菌剂，分析其对棉田后茬作物小麦生长发育的影响。结果表明，虫砂显著提升了小麦的株高、茎粗和叶绿素SPAD值，表现优于生物炭和粉煤灰，进一步验证了其作为有机肥在促进作物生长方面的应用潜力。

在缓解除草剂药害方面，前人研究表明，生

物炭、粉煤灰等吸附材料与微生物菌剂或腐植酸联合使用，均能在不同作物上有效缓解除草剂药害（李照怡等，2024），郭盘盘（2016）研究表明，施用复合菌肥可解除二氯喹啉酸对烟草的毒性，修复其光合性能。陈玉坤（2016）以牛粪有机肥、莠去津降解菌和生物炭为主要材料，研究莠去津对大豆药害的缓解效果，结果表明生物有机肥可以使大豆幼苗的叶绿素含量恢复至正常水平。李新安等（2015）研究发现，土壤中添加生物炭可以缓解咪唑乙烟酸对花生的药害，对花生各项生理指标有一定的修复效果。梁兵兵（2016）研究发现，木霉菌与生物炭均能对莠去津及烟嘧磺隆残留土壤起到修复作用，可以提高大豆、油菜的产量，缓解除草剂的发生。汤鸣强等（2013）研究表明，施用含有腐植酸的水溶肥可促进草甘膦除草剂的降解。本研究也得到相似结果，施用虫砂

等吸附剂可以减轻氟啶草酮对小麦的残留药害。此外,本研究同时将生物炭和粉煤灰做吸附剂并复配微生物菌剂对棉田小麦进行处理对比,发现虫砂复配十二菌医处理对除草剂药害的缓解效果最好。其缓解药害的机制可能是虫砂可提供微生物生长的碳源和微量元素,在还田后与菌剂形成协同作用,促进土壤微生物特别是降解菌的增殖与代谢活性,提升降解效率。

在产量构成因素上,各处理对小麦穗数、穗长、穗粒数及千粒重等指标均表现出不同程度的促进效果,虫砂复配十二菌医处理显著提高了小麦穗粒数和穗长,且优于其他处理组。表明虫砂与微生物菌剂联合应用能缓解除草剂毒害,且对小麦有促生长作用,增强作物营养吸收与抗逆能力,从而提高最终产量。

综合来看,虫砂复配十二菌医处理组的药害指数最低,相较CK显著降低81.95%,且小麦产量最高,较CK增产31.2%。虫砂等吸附剂与微生物菌剂复配使用,能有效缓解氟啶草酮与二甲戊灵对小麦生长造成的胁迫,改善各项生理指标,提高产量,为缓解氟啶草酮对小麦药害提供解决方案,是一种田间适应性良好的绿色高效种植技术。尤其是施用1 500 kg/hm²虫砂+150 kg/hm²十二菌医的组合,在本研究中表现出最优的综合效果。

参考文献 (References)

- Chen J, Wang Y, Bai YL. Analysis of the current situation and output efficiency of China's cotton industry and countermeasures [J]. *Cotton Science*, 2022, 44 (5): 3-10. [陈佳,王燕,白玉兰.我国棉花产业现状和产出效率分析及对策[J].棉花科学,2022,44(5):3-10]
- Chen Y. Study on Residue Analysis, Degradation, Adsorption-Desorption, and Leaching Characteristics of Atrazine in Soil [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. [陈叶.丙炔氟草胺在土壤中的残留分析、降解、吸附-解吸附及淋溶特性研究[D].贵州大学,2022]
- Chen YK. Preparation of New Functional Bioorganic Fertilizers and Their Mechanism to Alleviate Atrazine Residue Stress on Soybean Seedlings in Black Soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 140. [陈玉坤.新型功能生物有机肥的制备及其缓解黑土中残留阿特拉津对大豆幼苗胁迫的机制[D].哈尔滨:东北农业大学,2020:140]
- Dai Y, Pan Z, Xing C, et al. Rapid adsorption of acetochlor and metolachlor from aqueous solution onto solid waste coal fly ash [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 205: 222-235.
- Gao SP, Xu LH, Zheng CZ, et al. Research progress on the resource utilization of the white star flower beetle [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2023, 51 (21): 4-6. [高顺平,徐林海,郑成忠,等.白星花金龟资源化利用研究进展[J].安徽农业科学,2023,51(21):4-6]
- Guo PP, Meng N, Liu HS, et al. Repair effect of composite microbial fertilizer on photosynthetic characteristics of tobacco damaged by 2,4-Dichloroquinoline acetic acid [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45 (5): 91-95. [郭盘盘,孟南,刘华山,等.复合微生物菌肥对二氯喹啉酸危害下烟草光合特性的修复作用[J].河南农业科学,2016,45(5):91-95]
- Iwaniuk P, Łuniewski S, Kaczyński P, et al. The influence of humic acids and nitrophenols on metabolic compounds and pesticide behavior in wheat under biotic stress [J]. *Agronomy*, 2023, 13 (5): 1378.
- Khorram MS, Zhang Q, Lin D, et al. Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44: 269-279.
- Li PP. Research on the Transformation Ability of the White Star Flower Beetle on Livestock and Poultry Manure [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021. [李潘潘.白星花金龟对畜禽粪污转化能力的研究[D].泰安:山东农业大学,2021]
- Li XA, Li GL, Xie LF, et al. Study on the alleviating effect of biochar treatment on peanut imidazolinone herbicide damage [J]. *Journal of Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42 (19): 69-72. [李新安,李广颂,谢兰芬,等.生物炭处理对花生咪唑乙烟酸药害的缓解效果研究[J].广东农业科学,2015,42(19):69-72]
- Li ZY, Yang JZ, Yin XH, et al. Screening of detoxifying agents for residual 2,4-dichlorophenoxyacetic acid before tobacco planting [J]. *Tobacco Science*, 2024, 57 (4): 53-60. [李照怡,杨敬之,尹显慧,等.烟田前茬残留二氯喹啉酸的解毒剂筛选[J].烟草科技,2024,57(4):53-60]
- Liang BB. Main Environmental Behavior and Residue Remediation of Common Herbicides in Corn Fields [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016, 73. [梁兵兵.玉米田常用除草剂在土壤中的主要环境行为及残留修复[D].沈阳:沈阳农业大学,2016,73]
- Liu Y, Yao L, Hu B, et al. Adsorption behavior and residue degradation of triazine herbicides in soil amended with rice straw biochar [J]. *Agriculture*, 2023, 13 (7): 1282.
- Ma WZ. Economic Insects of China. Volume 46, Coleoptera: Scarabaeidae, Chrysomelidae, and Other Families [M]. Beijing: Science Press, 1995. [马文珍.中国经济昆虫志.第四十六册,鞘翅目:花金龟科、斑金龟科、弯腿金龟科[M].北京:科学出版社,1995]
- Ni H, Yao L, Li N, et al. Biodegradation of pendimethalin by *Bacillus subtilis* Y3 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 41: 121-127.
- Shi CX, Zhang GJ, Xu YS, et al. Effects of mixed substrate of white star flower beetle manure and sand on cucumber and pepper seedling

- growth [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2021, 44 (6): 443-447. [史长旭, 张广杰, 徐业山, 等. 白星花金龟虫粪砂混配基质对黄瓜和辣椒育苗效果的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2021, 44 (6): 443-447]
- Singh N. Adsorption of herbicides on coal fly ash from aqueous solutions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168 (1): 233-237.
- Sun CK. Research on the "Wheat Straw-King Oyster Mushroom-White Star Flower Beetle" Recycling Model [D]. Shandong Agricultural University, 2018. [孙晨可. "小麦秸秆-大球盖菇-白星花金龟" 循环模式研究 [D]. 山东农业大学, 2018]
- Tang MQ, Yao YQ. Discussion on the degradation of soil pesticide residues by foliar application of humic acid-containing baoye fertilizer [J]. *Humic Acid*, 2013, (02): 27-31. [汤鸣强, 姚源琼. 含腐植酸喷施宝叶面肥降解土壤农药残留探讨[J]. 腐植酸, 2013, (02): 27-31]
- Wang Y, Ma X, Saleem M, et al. Effects of corn stalk biochar and pyrolysis temperature on wheat seedlings growth and soil properties stressed by herbicide sulfentrazone [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 25: 102208.
- Wei FX. Methods for testing herbicide damage [J]. *Weed Science*, 1992, 3: 18-21. [魏福香. 除草剂药害试验方法 [J]. 杂草科学, 1992, 3: 18-21]
- Wu X, Hu CY, Cai RJ, et al. Effects of insect manure organic fertilizer on tomato growth and quality [J]. *Northern Horticulture*, 2019, 3: 60-64. [吴翔, 胡从勇, 蔡瑞婕, 等. 虫粪有机肥对番茄生长及品质的影响 [J]. 北方园艺, 2019, 3: 60-64]
- Yang S, Yin XH, Huang HG, et al. Repair effect of microbial inoculants on soil residue-induced tobacco phytotoxicity of 2, 4-dichloroquinoline acetic acid [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (5): 779-790. [杨森, 尹显慧, 黄化刚, 等. 微生物菌剂对二氯喹啉酸土壤残留致烟草药害的修复效应 [J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(5): 779-790]
- Yang XJ. Analysis of Microbial Community Changes During the Transformation of Straw Through the Gut and Analysis of the Insect Sand Effect [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. [杨小洁. 秸秆过腹转化的微生物群落变化解析及虫砂效应分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022]
- Zhang GJ. Study on the Effects of Insect-Fungus Composite Technology for Cotton Stalk Return on Cotton Growth and Development and Verticillium Wilt Occurrence [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. [张广杰. 虫菌复合技术转化棉秆还田对棉花生长发育及黄萎病发生的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022]
- Zhang GJ, Wang Q, Liu YS. Biological characteristics and application potential of the white star flower beetle under artificial conditions [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (2): 257-266. [张广杰, 王倩, 刘玉升. 白星花金龟人为条件生物学与应用潜力[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (2): 257-266]
- Zhao J, Kang Z, Han QQ, et al. Application and prospect of fly ash in soil improvement and remediation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45 (2): 1-6. [赵吉, 康振中, 韩勤勤, 等. 粉煤灰在土壤改良及修复中的应用与展望 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (2): 1-6]
- Zhao X, Peng PH, Li JJ. Experimental research on soil improvement of saline-alkaline land—using fly ash and coal gangue to improve saline-alkaline soil as an example [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (4): 70-74. [赵旭, 彭培好, 李景吉. 盐碱地土壤改良试验研究——以粉煤灰和煤矸石改良盐碱土为例 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, 39 (4): 70-74]