

引用格式:

姚雪梅, 陈立军, 欧阳玉, 阮彬洲, 丁春霞, 朱伟, 刘旭. 植烟土壤中二氯喹啉酸残留对烟草的药害及生物炭修复效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(2): 102–108.

YAO X M, CHEN L J, OUYANG Y, RUAN B Z, DING C X, ZHU W, LIU X. Phytotoxicity of quinclorac residues in tobacco-planting soil to tobacco and remediation effect of biochar[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(2): 102–108.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



植烟土壤中二氯喹啉酸残留对烟草的药害及生物炭修复效应

姚雪梅¹, 陈立军¹, 欧阳玉², 阮彬洲¹, 丁春霞², 朱伟¹, 刘旭^{1*}

(1. 湖南省烟草公司邵阳市公司, 湖南 邵阳 422000; 2. 湖南农业大学化学与材料科学学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 二氯喹啉酸易对烟草产生药害, 但土壤环境因子对烟草药害程度的影响及生物炭对其修复的机理还不明确。本研究对植烟土壤中二氯喹啉酸残留对烟草的药害程度与土壤环境因子进行了相关性分析, 在此基础上, 通过盆栽试验和田间小区试验探索了不同种类、不同用量生物炭对烟草二氯喹啉酸药害的修复效果。结果表明, 烟草药害程度等级与土壤中二氯喹啉酸残留量呈显著正相关, 与土壤中有机质含量呈显著负相关, 与土壤pH和碱解氮含量呈负相关。土壤中添加适量生物炭能够促进烟苗根系生长, 在二氯喹啉酸残留量为0.070 2 mg/kg的植烟土壤中添加1 500 kg/hm²的秸秆生物炭可提高土壤pH和有机质含量, 减少土壤中二氯喹啉酸的生物有效性, 缓解烟草二氯喹啉酸药害, 提高烤烟产量和产值。

关键词: 二氯喹啉酸; 生物炭; 烟草; 药害; 土壤修复

中图分类号: S572; S481.8

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2026)02–0102–07

Phytotoxicity of quinclorac residues in tobacco-planting soil to tobacco and remediation effect of biochar

YAO Xuemei¹, CHEN Lijun¹, OUYANG Yu², RUAN Binzhou¹, DING Chunxia², ZHU Wei¹, LIU Xu^{1*}

(1. Shaoyang Branch of Hunan Province Tobacco Company, Shaoyang, Hunan 422000, China;

2. School of Chemistry and Materials Science, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Quinclorac is prone to causing phytotoxicity on tobacco. However, the influence of soil environmental factors on the severity of tobacco phytotoxicity, as well as the remediation mechanism of biochar against such damage, remain unclear. In this study, correlation analysis was conducted between the degree of residual quinclorac-induced tobacco phytotoxicity and soil environmental factors. On this basis, pot experiment and field plot trials were carried out to investigate the remediation effects of different types and amounts of biochar on quinclorac-induced phytotoxicity in tobacco. The results showed that the phytotoxicity degree of tobacco was significantly positively correlated with the residual amount of quinclorac in soil, and significantly negatively correlated with soil organic matter content, while it presented a negative correlation with soil pH and the content of available nitrogen. The appropriate addition of biochar to soil could promote the root growth of tobacco seedlings. In tobacco-planting soil with quinclorac residue of 0.070 2 mg/kg, the application of 1 500 kg/hm² straw biochar could increase soil pH and organic matter content, reduce the bioavailability of soil quinclorac, alleviate quinclorac phytotoxicity in tobacco, and improve the yield and output value of flue-cured tobacco.

Keywords: quinclorac; biochar; tobacco; phytotoxicity; soil remediation

二氯喹啉酸(QC)是防治稗草的高效除草剂, 在我国稻区应用广泛。然而, 二氯喹啉酸在土壤中降解缓

收稿日期: 2025–04–22

修回日期: 2025–06–19

基金项目: 湖南省烟草公司邵阳市公司项目(sy202302)

作者简介: 姚雪梅(1984—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事烤烟栽培技术研究, 12659392@qq.com; *通信作者, 刘旭, 本科, 助理农艺师, 主要从事烟叶生产数字化转型研究, sunbxia@126.com

慢,其在多数土壤中的降解半衰期为23.9~32.4 d^[1]。前茬稻田用了二氯喹啉酸除草剂,其残留易对后茬作物烟草产生药害,影响其产量和品质^[2]。除草剂残留对烟草的药害程度主要受土壤环境影响,如土壤中除草剂残留量、有机质含量、pH及土壤养分含量等^[1,3]。有机质含量高的黏性土壤对除草剂吸附量较大,在除草剂残留量一致的前提下,除草剂对作物产生的药害较轻。杨金印等^[4]研究表明,因黏壤土中有机质含量比砂性土壤的高,烟草在黏壤土中遭受的药害程度更低。此外,土壤酸度也是影响烤烟除草剂药害等级的因素之一。土壤pH会影响除草剂的存在形态,从而改变土壤对药剂的吸附效果,使得除草剂的生物有效性不同,最终导致除草剂对烟草的药害程度出现差异^[5]。综上可见,烟草除草剂残留药害程度受诸多因素影响,实际生产中需分析土壤除草剂残留量及土壤理化性质等,综合研判药害风险。

近年来,对有除草剂残留风险的土壤进行修复,已引起研究者的广泛关注。以农业废弃物为原料生产的生物炭材料因具有较大比表面积、多孔结构及价格低廉等优势,常用于土壤改良及减少土壤除草剂残留对作物的危害^[6-10]。郑雄志等^[11]比较了生物炭和其他不同种类的化学解毒剂对烟草除草剂残留药害的修复效果,发现经生物炭修复后的烟株农艺性状、烟叶产量、产值均高于其他化学解毒剂的,修复效果最佳。OUYANG等^[12]研究发现,改性生物炭能够有效减轻二氯喹啉酸对烟苗造成的药害,表明生物炭可用于缓解烤烟除草剂残留药害。然而,目前关于二氯喹啉酸致烟草药害的影响因素,以及生物炭的修复效果与作用机理,尚缺乏系统深入的研究。

本文以二氯喹啉酸为对象,系统分析其残留量对烟草的药害程度及其与土壤理化性质的相关性,并探究不同农业废弃物制备的热解生物炭对该药剂药害的修复效应,以期对烟稻轮作区除草剂残留的药害风险预判和修复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试药剂和试剂:除草剂为98.5%二氯喹啉酸原药,由浙江新安化工集团股份有限公司提供;果壳生物炭(pH=6.8,有机质质量分数为73.1%,总养

分质量分数为5.7%)与秸秆生物炭(pH=7.3,有机质质量分数为76.5%,总养分质量分数为6.6%),购自河南厚森环保科技有限公司;甲醇(色谱纯)、乙酸(分析纯)、乙腈(分析纯)、甲酸(分析纯)和氯化钠(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。

供试作物:烟草品种为‘云烟87’,由湖南省烟草公司邵阳市公司提供。

土壤样品:分别于2024年1月和4月在湖南省邵阳市隆回县的二氯喹啉酸残留高风险区采集烟草移栽前和发生药害时的土壤样品。采用五点取样法采集深度为0~20 cm的耕作层土壤,每个样品质量不低于1 kg,去除植物、碎石后置于阴凉干燥处风干,然后过孔径为850 μm 的筛,留待检测分析。

1.2 主要仪器

高效液相色谱仪(安捷伦1260,美国安捷伦科技有限公司),涡旋仪(NP-30S,贵州恩谊科技有限公司),离心机(H/T12MM,湖南赫西仪器装备有限公司),pH计(PHS-3C,上海仪电科学仪器股份有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤样品前处理及测定方法

前处理:称取5.0 g待测土壤样品置于离心管中,加入乙腈溶液(含1%甲酸),涡旋振荡10 min。加入2 g氯化钠,离心静置。取2.00 mL上层清液加入含C18的离心管中,涡旋振荡,过0.45 μm 有机滤膜后待测。

色谱测定条件:色谱柱为Hypersil-C18不锈钢柱(250.0 mm $\times$ 4.6 mm, 5.0 μm);检测器为紫外检测器,检测波长为240 nm;流动相为甲醇和1%乙酸水溶液(体积比为45:55),流速为1 mL/min;柱温为30 $^{\circ}\text{C}$;进样量为20 μL ;在该色谱条件下,二氯喹啉酸保留时间为8.9 min。

土壤pH的测定参照HJ 962—2018《土壤pH值的测定 电位法》^[13]。土壤各项养分数据参照《土壤农化分析》^[14]进行测定。

1.3.2 盆栽试验

在一定量土壤中均匀喷洒二氯喹啉酸农药,使土壤中该农药有效成分含量为0.05 mg/kg。土样放置3个月后,按试验设计添加不同比例的果壳生物炭并充分混匀,随后装入花盆(直径 $\times$ 高为100 mm $\times$ 85 mm)中。试验共设4组处理:CK(空白对照,不含

二氯喹啉酸), A0(含二氯喹啉酸, 不加生物炭), A1(含二氯喹啉酸, 加1%生物炭)和A2(含二氯喹啉酸, 添加2%生物炭)。选取长势一致、处于四叶一心期的烟苗移栽到盆中, 每盆1株, 每个处理10株。定期浇水, 观察并记录烟草生长情况。

参照YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》^[15], 测量植株顶叶下第4片叶的叶长、叶宽、株高、茎粗和叶片数; 收获时将带有根系的整棵烟株从土壤中挖出, 将根系洗净后, 采用LA-S植物根系分析仪测定根长、表面积、根体积和平均直径; 采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定植株根系活力。

1.3.3 田间小区试验

田间小区试验于2024年3—7月在湖南省邵阳市隆回县荷香桥镇完成。该田块前茬种植水稻时施用了二氯喹啉酸, 修复前检测出土壤中二氯喹啉酸的残留量达0.070 2 mg/kg。

在移栽烟苗前, 在垄上撒施生物炭进行修复处理。共设置7个处理: CK(不修复), T1(1 500 kg/hm²果壳生物炭)、T2(3 000 kg/hm²果壳生物炭)、T3(4 500 kg/hm²果壳生物炭), T4(1 500 kg/hm²秸秆生物炭)、T5(3 000 kg/hm²秸秆生物炭)、T6(4 500 kg/hm²秸秆生物炭)。试验期间, 田间管理和病虫害防治措施按照当地优质烟叶生产技术规范进行; 参照YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》测定烟株农艺性状指标; 烟叶烘烤结束后, 参照GB 2635—1992《烤烟》对各处理烤后烟叶样品分级并评价其经济性状指标; 烟株根系土壤中二氯喹啉酸残留量、pH以及有机质含量按照1.3.1中方法测定。

1.4 数据处理

参照YC/T 526—2015《烟草除草剂药害分级及调查方法》^[16], 划分烟株药害等级并借助Origin 2021软件中的Correlation Plot插件, 对烟草药害等级与二氯喹啉酸残留量、土壤pH以及土壤中养分含量进行皮尔逊相关分析。

所有实验数据通过Excel 2016进行整理, 采用SPSS 24.0软件对烟草植株主要农艺性状数据进行显著性分析, 采用Origin 2021软件作图。

2 结果与讨论

2.1 二氯喹啉酸对烟草的药害程度及其与土壤环境因子的相关性

烟田土壤样品理化性质、二氯喹啉酸残留量与烟草药害等级见表1(其中编号1~9分别代表不同烟田中的土壤样品)。由表1可见, 烟草药害等级与土壤中二氯喹啉酸残留量密切相关。当植烟土壤中二氯喹啉酸残留量为0.024 1~0.030 7 mg·kg⁻¹时, 烟草没有出现药害症状, 药害等级为0级; 当土壤中二氯喹啉酸残留量达到0.079 9~0.087 8 mg·kg⁻¹时, 烟草药害等级达到7~9级。然而, 土壤中二氯喹啉酸残留量与烟草药害等级之间并无简单线性相关性。例如, 5号土壤中二氯喹啉酸残留量(0.086 6 mg·kg⁻¹)低于9号土壤中二氯喹啉酸残留量(0.087 8 mg·kg⁻¹), 然而, 5号土壤中烟草药害等级却高于9号土壤中烟草药害等级, 烟草植株所有叶片叶背严重翻卷, 叶宽抑制率超50%, 已达最高药害等级9级(图1)。因此, 尚需进一步分析其他因素对烟草药害的影响。

表1 植烟土壤理化性质、二氯喹啉酸残留量及烟草药害等级

Table 1 Physical and chemical properties of tobacco-growing soil, quinclorac residue, and tobacco phytotoxicity degree								
编号	土壤中二氯喹啉酸残留量/(mg·kg ⁻¹)		pH	土壤理化参数				药害等级
	出现药害时	烟苗移栽前		有机质质量分数/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	
1	0.059 9	0.079 9	6.76	27.21	61.6	17.46	172.0	3级
2	0.056 6	0.070 2	6.20	23.10	126.0	12.68	246.0	3级
3	0.024 1	0.069 7	6.56	34.51	163.8	25.78	234.5	0级
4	0.030 7	0.085 1	6.45	38.83	161.0	25.27	186.5	0级
5	0.086 6	0.087 8	7.23	20.91	65.8	30.56	243.5	9级
6	0.079 9	0.087 6	6.18	23.82	182.0	43.41	488.5	7级
7	0.082 4	0.089 3	6.15	26.26	107.8	9.15	205.0	7级
8	0.085 7	0.089 5	5.30	29.20	156.8	6.63	214.0	7级
9	0.087 8	0.089 9	5.47	26.26	119.0	27.54	341.5	7级

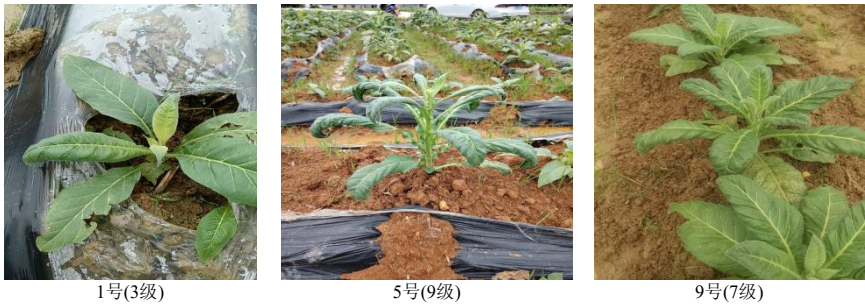
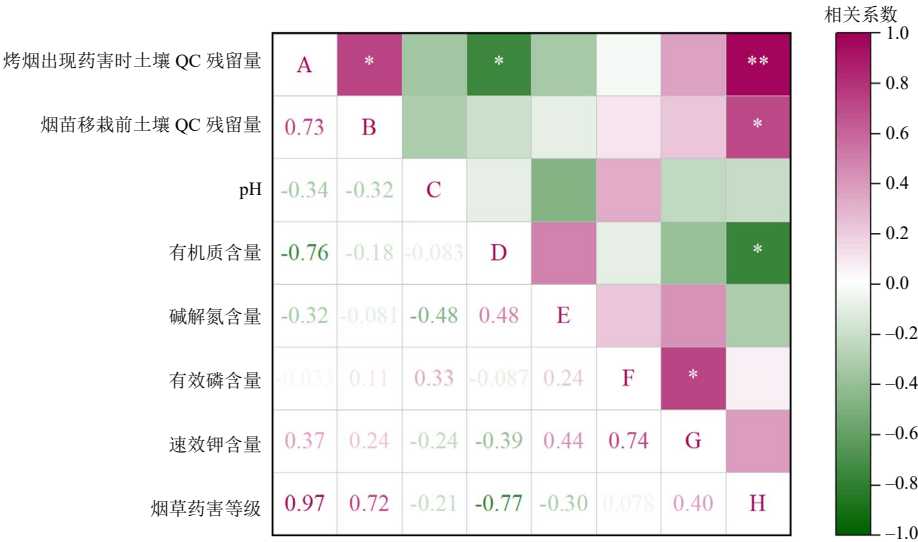


图1 不同级别烟草药害

Fig. 1 Different levels of quinclorac phytotoxicity on tobacco

各项指标的皮尔逊相关分析结果如图2所示。从图2可以看出，烟草药害等级与出现药害时土壤中二氯喹啉酸残留量呈极显著正相关($P\leq 0.01$)，相关系数高达0.97；与烟苗移栽前土壤中二氯喹啉酸残留量呈显著正相关($P\leq 0.05$)，相关系数为0.72。因此，移栽前取土壤进行除草剂残留量测定有助于判断后期药害发生情况，确定是否需要采取修复手段。烟草药害等级与土壤有机质含量呈显著负相关($P\leq 0.05$)，相关系数达到-0.77。究其原因，一方面，有机质中具有与有机农药结合的位点，有机质含量提高将导致土壤对除草剂的吸附能力增强^[4-5]。董永亮等^[5]发现，去除供试土壤中有机质以后，土壤对二氯喹啉酸的吸附能力明显减弱。另一方面，有机质也会影响除草剂残留在土壤中的生物有效性。

烟草药害等级还与土壤pH和碱解氮含量呈负相关，相关系数分别为-0.21和-0.30。土壤pH是影响二氯喹啉酸半衰期的重要环境因素，在酸性环境中，二氯喹啉酸降解慢，半衰期长^[1]。通常可采用增施生石灰以提高土壤pH的方式来加速残留除草剂的分解，减轻其对作物的危害。土壤碱解氮等养分含量提高，会促进作物生长，从而提高其抗胁迫能力。在土壤除草剂残留量相等的情况下，肥力水平较高的土壤中，作物受除草剂药害的程度较低。王诚浩等^[17]研究发现，烟草二氯喹啉酸药害轻症可以通过后期田间管理(如增施肥料、喷洒微生物肥料等)得到部分修复。以上结果表明，烟草药害程度除了与土壤中二氯喹啉酸残留量密切相关外，还受土壤理化性质影响。



图中A~H分别表示出现药害时土壤中QC残留量、烟苗移栽前土壤中QC残留量、pH、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量以及烟草药害等级。*和**分别表示显著($P\leq 0.05$)、极显著($P\leq 0.01$)相关。

图2 烟草药害等级与土壤环境因子之间皮尔逊相关性分析结果

Fig. 2 Pearson correlation analysis result of tobacco phytotoxicity grade and soil environmental factors

2.2 生物炭对烟草药害修复的盆栽试验结果

采用盆栽试验考察不同处理对烟苗生长发育

的影响，结果分别见图3和表2。由图3可见，在二氯喹啉酸胁迫下，A0植株矮小，叶片严重卷曲，而

添加了生物炭的A1烟株挺拔，叶片完全舒展，生长状况与CK无显著差异。除叶片数以外，A1处理下烟株叶长等指标均明显优于A0处理的。相较于CK，A1叶长、叶宽、茎粗、鲜质量和干质量分别提高了0.61%、18.39%、23.10%、22.42%和7.50%，说明添加生物炭不仅可以缓解二氯喹啉酸对烟草的药害，而且在一定程度上促进了植株的生长。A2处理的烟株生长态势弱于对照组的，生长指标基本与未修复的A0处理无显著差异，表明过量施用生物炭可能会对植物生长造成负面影响。适量施用生物炭可改良土壤理化性状，促进烟株生长发育，增加干物质积累，进而提升烟叶产量与产值^[18]；但生物炭施用量过高时，会导致土壤盐基离子富集，影响烟株对养分的吸收，最终抑制植株生长。



图3 不同处理下烟株长势照片
Fig. 3 Photographs of tobacco plant growth under different treatments

表2 不同处理对烟株生长的影响

Table 2 Effects of different treatments on the growth of tobacco							
处理	叶长/cm	叶宽/cm	株高/cm	茎粗/cm	叶片数	鲜质量/g	干质量/g
CK	28.00±0.89 ^a	9.57±0.32 ^{ab}	29.93±0.88 ^a	2.90±0.12 ^b	13.33±0.88 ^a	53.96±3.89 ^a	5.33±0.32 ^a
A0	16.70±0.40 ^b	4.93±1.09 ^{cd}	8.63±0.26 ^c	2.70±0.06 ^b	9.67±0.67 ^c	17.80±2.47 ^b	1.67±0.22 ^b
A1	28.17±2.32 ^a	11.33±1.42 ^a	26.57±0.61 ^b	3.57±0.20 ^a	11.67±0.33 ^{ab}	66.06±14.17 ^a	5.73±0.37 ^a
A2	23.45±0.65 ^b	8.85±0.55 ^{bc}	9.00±0.40 ^c	2.80±0.20 ^b	11.00±1.00 ^{ab}	31.82±7.32 ^b	3.42±0.85 ^b

注：表中数据为3次重复的平均值±标准差；同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

烟草移栽48 d后不同处理组烟草植株根系的发育状况分别见图4和表3。由图4可见，A0植株根系瘦弱，受二氯喹啉酸胁迫作用明显。A1根系生长状况显著改善，而A2根系各项数据与A0均无显著差

异(表3)。此时虽然烟草二氯喹啉酸药害症状得以缓解，但是过量的生物炭反而抑制了植株的生长。因此，在实际应用中，修复剂用量要适宜。

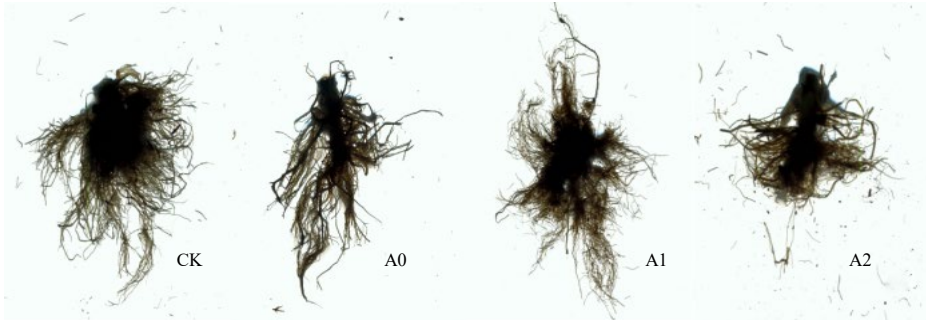


图4 移栽48 d后不同处理组烟草植株根系的生长发育状况
Fig. 4 The growth and development of tobacco roots after transplanting for 48 d

表3 移栽48 d后不同处理组烟株根系的生长发育指标

Table 3 Root growth and development indexes of tobacco roots after transplanting for 48 d					
处理	总根长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根平均直径/mm	根系活力/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK	249.65±42.08 ^b	335.31±73.88 ^b	127.78±54.57 ^b	2.39±0.55 ^a	20.24±7.09 ^a
A0	212.26±16.67 ^b	159.27±4.31 ^c	24.66±4.98 ^c	1.93±0.11 ^b	15.56±6.45 ^b
A1	417.50±88.16 ^a	809.45±37.44 ^a	354.19±53.35 ^a	2.43±0.69 ^a	27.71±15.01 ^a
A2	154.88±0.22 ^b	151.89±18.52 ^c	35.68±3.59 ^c	2.14±0.33 ^a	21.38±4.18 ^a

注：同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3 生物炭对烟草药害修复的田间试验结果

田间试验结果分别见图5、表4和表5。由图5可见，CK组烟草植株上部叶出现了明显卷曲，药害等级达到3级；而经生物炭修复过的区域植株叶片舒展，药害等级为0级。由表4可见：各处理组烟株上部叶宽均与CK存在显著差异，单片叶鲜质量增加13.06%~44.63%；处理组烟草叶片面积较CK显著增加，T2、T3、T4、T5、T6叶面积分别增加了74.28%、58.60%、66.90%、80.78%、71.81%。由表5可见，

不同处理组土壤中二氯喹啉酸的残留量均高于CK的。究其原因，生物炭可对二氯喹啉酸产生富集效应，降低该农药在土壤中的生物有效性。与此同时，施用生物炭还能提升土壤有机质质量分数(表5)与pH^[19]。此外，生物炭可为微生物提供可利用碳源，激活土壤微生物代谢活动，提高土壤中微生物群落的活性和多样性^[20]，从而提高烟草植株的抗胁迫能力，促进烟株生长^[21-22]。



图5 烟草二氯喹啉酸药害症状及生物炭修复效果

Fig. 5 Quinlorac phytotoxicity on tobacco and the remediation effect of biochar

表4 不同生物炭处理对烟株上部叶的影响

Table 4 Effects of different biochar treatments on the upper leaves of tobacco plants

处理	叶长/cm	叶长修复率/%	叶宽/cm	叶宽修复率/%	叶面积/cm ²	单片叶鲜质量/g	药害等级
CK	63.98±2.00 ^b	—	12.85±0.85 ^b	—	523.78±47.01 ^b	30.94	3级
T2	68.30±1.94 ^{ab}	6.76	21.15±1.31 ^a	64.59	912.84±38.37 ^a	34.98	0级
T3	66.18±1.36 ^{ab}	3.44	19.78±0.60 ^a	53.89	830.72±34.09 ^a	41.62	0级
T4	66.85±2.13 ^{ab}	4.49	20.60±1.09 ^a	60.31	874.18±57.77 ^a	42.48	0级
T5	71.23±2.10 ^a	11.33	21.03±1.26 ^a	63.62	946.90±43.17 ^a	42.70	0级
T6	70.08±2.34 ^{ab}	9.53	22.20±0.70 ^a	72.80	899.90±54.04 ^a	44.75	0级

注：同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)；T1处理由于未收集到有效数据，不纳入比较分析。

表5 不同处理对土壤QC残留量、有机质含量和pH影响

Table 5 Effects of different treatments on contents of soil quinlorac residues, organic matter and pH

处理	QC残留量/(mg·kg ⁻¹)	有机质质量分数/(g·kg ⁻¹)	pH
CK	0.056 6	17.82	5.20
T1	0.061 0	17.93	5.49
T2	0.058 3	19.03	5.54
T3	0.063 7	20.03	5.67
T4	0.061 1	17.94	5.47
T5	0.067 6	18.56	5.64
T6	0.065 8	20.13	5.68

不同处理下烟草烤后经济性性状见表6。由表6可见，与CK相比，生物炭处理后烤烟产量和产值均有一定增加，且增加幅度随生物炭用量增加而增大。相较于CK组，各处理组产量提高了4.7%~12.1%，产值提高了9.9%~21.0%。相同施用量下，秸秆生物炭的修复效果优于果壳生物炭(T6比T3的大，T5比T2的大，T1由于未收集到有效测产数据，故不纳入比较分析)。这一差异可能与秸秆生物炭有机质含量、pH更高有关。综合考虑修复成本与经济效益，

1 500 kg/hm²秸秆生物炭可用于修复二氯喹啉酸残留引发的烟草药害。

表6 不同处理下烟草烤后经济性状

Table 6 Economic traits of the flue-cured tobacco under different

处理	treatments			
	烤烟产量/ (kg·hm ⁻²)	烤烟上等烟 比例/%	烤烟中上等烟 比例/%	烤烟产值/ (元·hm ⁻²)
CK	1 556.9	37.8	82.8	51 175.3
T2	1 629.6	39.5	86.5	56 264.6
T3	1 709.1	39.8	87.2	58 867.2
T4	1 644.6	38.2	85.3	56 469.8
T5	1 668.6	39.5	86.1	57 256.1
T6	1 745.5	40.1	87.6	61 946.9

3 结论

1) 烟草二氯喹啉酸药害程度与出现药害时土壤中的二氯喹啉酸残留量呈极显著正相关,与移栽前土壤中的二氯喹啉酸残留量呈显著正相关,与土壤有机质含量呈显著负相关,与土壤pH、碱解氮含量呈负相关。

2) 施用一定量的秸秆生物炭和果壳生物炭不仅可有效缓解烟草二氯喹啉酸药害,而且还能提高土壤有机质的含量及土壤pH,有利于提高烟草抗胁迫能力,促进烟株的生长,提高烤烟的产量和产值。在施用量相同的情况下,秸秆生物炭对烟草二氯喹啉酸药害的修复效果比果壳生物炭的好,对于高风险区植烟土壤,可采用1 500 kg/hm²秸秆生物炭进行修复治理。

参考文献:

[1] 张倩,郭伟,宋超,等. 二氯喹啉酸在不同土壤中的降解规律及其影响因子[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(6): 83-88.

[2] 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.

[3] 陈泽鹏,王静,万树青,等. 广东部分地区烟叶畸形生长的原因及治理的研究[J]. 中国烟草学报, 2004, 10(3): 34-37, 46.

[4] 杨金印,彭梁睿,李彩斌,等. 不同质地土壤中烟碱降解特征与烟草致害阈值研究[J]. 中国烟草科学, 2023, 44(6): 29-35.

[5] 董永亮,李旭辉,郭小刚. pH值对土壤吸附二氯喹啉酸的影响研究[J]. 中国环保产业, 2019(2): 60-63.

[6] MOJIRI A, ZHOU J L, ROBINSON B, et al. Pesticides

in aquatic environments and their removal by adsorption methods[J]. Chemosphere, 2020, 253: 126646.

[7] 杨梅,罗松平,荆诚然. 生物炭对喀斯特黄壤地区施用除草剂土壤养分及作物生长的影响[J]. 中国水土保持, 2024(8): 41-46, 63.

[8] 闫萌,李倩,张翔,等. 烟田土壤中残留除草剂的药害及修复研究概述[J]. 世界农药, 2025, 47(3): 18-22, 54.

[9] 何罗驭阳,杨佳宜,廖桂平,等. 3种生物炭的表征及其在烤烟生产上的效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 15-20.

[10] 于丽明,初正崑,袁延飞,等. 生物炭-城市污水厂污泥堆肥复合改良剂对盐渍土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(2): 68-79.

[11] 郑雄志,李宏光,龙世平,等. 几种解毒剂对烟田二氯喹啉酸次生药害的修复效果[J]. 南方农业学报, 2013, 44(3): 426-430.

[12] OUYANG Y, ZHU W, YAO X M, et al. ZnCl₂ and thiourea co-modified biochar for effectively removing quinclorac in water and soil: Mechanism and alleviating its phytotoxicity on tobacco plants[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 350: 127865.

[13] HJ 962—2018. 土壤pH值的测定 电位法[S].

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] YC/T 142—2010. 烟草农艺性状调查测量方法[S].

[16] YC/T 526—2015. 烟草除草剂药害分级及调查方法[S].

[17] 王诚浩,匡传富,唐文帮. 烟稻轮作系统水稻除草剂用量对烟草叶片的影响及其土壤残留[J]. 作物研究, 2015, 29(S2): 864-867.

[18] 琚晨仪,王珍珍,肖庆礼,等. 生物炭添加对重庆山区烟田土壤理化性质和烤烟生长、产量及产值的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 205-214.

[19] 张广雨,胡志明,褚德朋,等. 生物炭对根际土壤微生物的调控及对烟草青枯病的防控作用[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(6): 81-88.

[20] 郑健,石聪,杨少鸿,等. 基于¹⁵N示踪的炭氮耦合对番茄氮素吸收利用效益的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(9): 933-942.

[21] 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.

[22] 何聪莲,顾浩,张锦韬,等. 氮肥配施生物炭对烤烟生长及烤后烟叶化学品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(6): 1014-1020.

责任编辑: 伍锦花