



汤宏,王建伟,曾掌权,等.连作烤烟土壤特征及连作障碍防控技术研究进展[J].黑龙江农业科学,2024(8):109-117.

连作烤烟土壤特征及连作障碍防控技术研究进展

汤宏^{1,2},王建伟¹,曾掌权³,刘伦沛¹,阮运飞¹,梁春华¹,冷丽娟¹

(1.凯里学院理学院,贵州凯里 556011; 2.河池学院化学与生物工程学院/广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室/广西现代蚕桑丝绸协同创新中心/微生物及植物资源开发利用广西高校重点实验室,广西河池 546300; 3.湖南省林业科学院/湖南衡山森林生态系统定位观测研究站,湖南长沙 410004)

摘要:为深入阐明烤烟连作障碍的发生机制和科学选择综合防控措施,以期最大限度消减烤烟连作障碍,实现我国烤烟种植业的绿色、高效和可持续发展。从连作烤烟土壤理化性状特征、连作烤烟土壤酶活性特征、连作烤烟土壤化感物质变化特征、连作烤烟土壤微生物群落结构和多样性变化特征等方面综述了连作烤烟土壤的特征。从培育耐连作烤烟抗性品种、优化种植制度、合理施用不同种类肥料制剂、连作土壤消毒和生物防治等方面,总结了当前我国烤烟连作障碍的防控措施,并对今后烤烟连作障碍的研究方向及防控技术最新发展方向进行了展望。

关键词:烤烟;连作障碍;防控技术;连作土壤特征

烤烟属于茄科(Solanaceae)烟草属(*Nicotiana*)植物,是我国也是世界上栽培面积最大的烟草类型,是卷烟工业的主要原料。烤烟作为我国重要的经济作物之一,在我国绝大部分省份均有种植,2022年全国烤烟种植面积达 1.044×10^6 hm²,产量达218.8万t^[1]。烤烟种植具有较高的经济效益,复种指数高,连作普遍,我国每年烤烟连作面积至少占种植总面积的30%以上^[2]。由于连作会引起烟田土壤理化性质和生物学性质恶化,同时引发烤烟土传病虫害加剧、生长发育不良、产量下降和品质变劣等现象,即连作障碍^[3]。连作障碍给我国烤烟生产带来严重的经济损失,严重威胁烤烟种植业的可持续发展^[4]。因此,本文深入探讨了烤烟连作条件下烟田土壤的理化特征和生物学特征,以期探明连作障碍产生的机理和探寻

消减连作障碍的技术措施,为我国烤烟种植业的可持续发展提供重要技术支撑。

1 连作烤烟土壤理化性状和生物学特征

1.1 土壤理化性状特征

土壤的物理质量是保障作物正常生长发育的前提和基础,并影响着土壤的肥力水平和生物学性状,进而影响到作物生产。烤烟长期连作后,烟田土壤物理性状发生显著变化,会引起烟田土壤压实、土壤比重和容重增加、有效孔隙度数量减少、良好结构的团聚体含量下降、土壤质地变劣等变化^[5]。同时,烤烟长期连作后由于对养分的选择性吸收和施肥的相对固定化,导致土壤养分失衡,土壤盐渍化、酸化板结,严重影响烤烟的生长发育(表1)。

表1 烤烟连作土壤理化性状变化特征

土壤化学指标	土壤化学指标变化特征
pH	连作后,红壤和紫色土烟田土壤pH均下降,分别从连作1a和3a开始显著下降,连作5a时pH分别下降了0.54和0.43 ^[6] ;pH呈降低趋势,烟田土壤pH由连作4a时的7.63降至连作16a时的6.41 ^[7] ;连作的相邻茬次间,烟田土壤pH年均下降0.05 ^[8] ;连作5a后,水稻土和红壤烟田土壤pH分别显著下降2.20和1.26,紫色土烟田土壤pH无明显变化 ^[9] ;连作6a后,烟田土壤pH下降了0.59 ^[10]
有机质	连作5a后,红壤和紫色土烟田土壤的有机质含量呈不同程度地增加,红壤烟田有机质含量增加至53.59 g·kg ⁻¹ ,紫色土烟田土壤有机质含量增加不显著 ^[6] ;连作5a后,水稻土和红壤烟田土壤有机质含量分别显著增加了6.53和25.96 g·kg ⁻¹ ,紫色土有机质含量增加1.68 g·kg ⁻¹ ^[9,11] ;连作16a后,烟田土壤有机质含量较连作4a降低了37.15% ^[7]

收稿日期:2024-03-17

基金项目:黔东南州基础研究计划项目(黔东南科合基础[2022]15号);贵州省科学技术基金项目(黔科合LH字[2014]7220)。

第一作者:汤宏(1974—),男,博士,教授,从事土壤化学与生态环境及土壤肥力研究。E-mail:th741113@126.com。

通信作者:王建伟(1982—),男,博士,教授,从事植物营养与调控研究。E-mail:agan1982@126.com。

表 1 (续)

土壤化学指标	土壤化学指标变化特征
全量氮、磷、钾	与正茬相比,连作 5 a 后,烟田土壤全量氮、磷、钾分别增加了 14.37%、68.84%和 27.58% ^[12] ;连作后,烟田土壤全量氮和磷先降低后升高 ^[13] ;连作 5 a 后,水稻土烟田土壤全氮、全磷含量分别显著增加 0.48 和 0.36 g·kg ⁻¹ ,全钾增加了 1.36 g·kg ⁻¹ ,红壤烟田土壤全氮、全磷含量分别显著增加 1.26 和 0.10 g·kg ⁻¹ ,全钾显著降低了 10.53 g·kg ⁻¹ ,紫色土烟田土壤全磷、全钾含量分别降低了 0.07 和 1.03 g·kg ⁻¹ ,全氮增加了 0.01 g·kg ⁻¹ ^[9]
碱解氮、有效磷和速效钾	连作后,烟田土壤碱解氮含量降低,有效磷、速效钾含量增加 ^[14] ;连作后,烟田土壤碱解氮含量降低,速效钾含量增加 ^[15] ;连作 5 a 后,水稻土烟田土壤碱解氮、有效磷含量分别显著增加了 44.27 和 44.96 mg·kg ⁻¹ ,速效钾显著降低了 340.67 mg·kg ⁻¹ ;红壤烟田土壤碱解氮、有效磷含量分别显著增加了 126.33 和 11.90 mg·kg ⁻¹ ,速效钾显著降低了 72.33 mg·kg ⁻¹ ;紫色土烟田土壤碱解氮、有效磷含量分别降低了 1.80 和 0.64 mg·kg ⁻¹ ,速效钾含量显著增加了 120.00 mg·kg ⁻¹ ^[9] ;连作 6 a 后,烟田土壤有效磷和速效钾含量分别从 13.33 mg·kg ⁻¹ 增至 17.54 mg·kg ⁻¹ 和从 233.09 mg·kg ⁻¹ 增至 285.19 mg·kg ⁻¹ ^[10]
钙、镁、硫	连作后,烟田土壤钙、镁、硫等养分出现不同程度的积累 ^[16] ;连作后,烟田土壤钙含量无明显变化,镁含量呈降低趋势,硫含量先降低后升高 ^[17]
微量营养元素	连作后,烟田土壤水溶性氯含量增加 ^[17]

1.2 连作烤烟土壤生物学性状特征

1.2.1 酶活性 土壤酶是土壤中各种生物化学过程的催化剂,如腐殖质的分解与合成、动植物残体和微生物残体的分解、及其合成有机化合物的水解与转化,某些无机化合物的氧化、还原等反应。土壤酶活性能很好地反映土壤微生物群落结构和丰度,同时也是重要的土壤肥力指标。目前在土壤中已经发现 50~60 种酶,研究较多的有氧化还原酶、转化酶和水解酶三类。以往研究表明

(表 2),烤烟连作后,大多数的土壤酶如蔗糖酶、脲酶、蛋白酶、淀粉酶和纤维素酶等的活性均有降低的变化趋势,而多酚氧化酶和脱氢酶等的活性则增强。连作后,关于土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性的研究结论不尽相同,但大部分研究的结论均表明这两种酶的活性降低。土壤酶活性变化的不确定性说明某些土壤酶的活性受多种因素的综合影响,比如土壤环境的复杂性、气候环境的不同、烤烟品种的差异等。

表 2 烤烟连作土壤酶活性变化特征

土壤酶种类	土壤酶活性变化特征
酸性磷酸酶	连作后,烟田土壤酸性磷酸酶活性下降 ^[18-20] ,连作 3 a 磷酸酶活性为 0.36 mg·(g·h) ⁻¹ ,连作 20 a 时降低至 0.18 mg·(g·h) ⁻¹ ^[21] ,连作 4 a 时为 1.48 mg·g ⁻¹ 、连作 16 a 时降低至 1.29 mg·g ⁻¹ ^[7] ;酸性磷酸酶活性先增强后降低 ^[22-23] ;酸性磷酸酶活性增强 ^[6,11,24]
脲酶	连作后,烟田土壤脲酶活性增强 ^[6,11,24-25] ,连作 3 a 时活性为 13.02 mg·(kg·h) ⁻¹ 、连作 20 a 增加至 33.75 mg·(kg·h) ⁻¹ ^[21] ;连作后,脲酶活性先增强后降低 ^[22-23,26] ;连作后,脲酶活性降低 ^[19,27-28] ,连作 4 a 时活性为 0.60 mg·g ⁻¹ 、连作 16 a 时降低至 0.45 mg·g ⁻¹ ^[7] ;连作 6 a 后,脲酶活性分别比玉米-烤烟-烤烟轮作和烤烟-玉米轮作下降 36.81%和 29.04% ^[10]
蔗糖酶	连作后,烟田土壤蔗糖酶活性降低 ^[10-11,19-20,24] ,连作 4 a 时活性为 13.82 mg·g ⁻¹ 、连作 16 a 降低至 12.25 mg·g ⁻¹ ^[7] ;连作 3 a 时活性为 136.05 μg·(g·d) ⁻¹ 、连作 20 a 降低至 98.53 μg·(g·d) ⁻¹ ^[21] ;连作后,蔗糖酶活性先增强后降低,连作 6 a 后,烟田土壤蔗糖酶活性分别比玉米-烤烟-烤烟轮作和烤烟-玉米轮作低 17.89%和 8.94% ^[13] ;蔗糖酶活性无显著变化 ^[23]
蛋白酶	连作 20 a 后,烟田土壤蛋白酶活性较连作 3 a 时,降低 6.72% ^[21]
多酚氧化酶	连作 20 a 后,烟田土壤多酚氧化酶活性增至连作 3 a 时的 3.14 倍 ^[21] ;连作后,烟田土壤多酚氧化酶活性增强 ^[25]
过氧化氢酶	连作后,过氧化氢酶活性增强 ^[20,25] ,连作 20 a 后,烟田土壤过氧化氢酶活性增至连作 3 a 时的 1.52 倍 ^[21] ,连作 6 a 后,连作过氧化氢酶活性分别比玉米-烤烟-烤烟轮作和烤烟-玉米轮作高出 9.08%和 17.42% ^[10] ;连作后,过氧化氢酶活性先增强后降低 ^[22-23,26] ;过氧化氢酶活性降低 ^[6,11,24,27-28] ,连作 4 a 时活性为 3.82 mg·g ⁻¹ 、连作 16 a 时降低至 2.05 mg·g ⁻¹ ^[7]
淀粉酶	连作后,烟田土壤淀粉酶活性先增强后降低 ^[29-30]
纤维素酶	连作后,烟田土壤纤维素酶活性剧烈下降 ^[29] ;纤维素酶活性先增强后降低 ^[30]
脱氢酶	连作后,烟田土壤脱氢酶活性增强 ^[25]

1.2.2 化感物质 化感物质(Allelochemical)是由植物(包括微生物)通过代谢途径所释放的一定数量和种类的化学物质^[22]。常见的化感自毒物质主要包括酚类(邻苯二酚、间苯三酚、邻叔丁基苯酚、对叔丁基苯酚)、酸类(阔马酸、对羟基苯甲酸、香草酸、苯甲酸、肉桂酸、阿魏酸)、醛类[醛类对羟基苯甲醛、3-甲氧基-4-羟基苯甲醛(香兰素)]、酯类(邻苯二甲酸二异丁酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二异辛酯)、醇类(丁醇)等几类化合物,化感物质具有化感作用,对其他植物(微生物)的化感作用可分为直接或间接的促进或抑制作用^[31-33]。烤烟是一种重要的化感作物,连作

后,烤烟会向环境中释放一定数量和种类的化感物质,烟田土壤中化感物质的含量均会随连作年限的增加而增加(表3)。化感作用一般有两种表现形式,即自毒作用和化感作用。自毒作用是指发生在种内的生长抑制作用。连作条件下,影响后茬烤烟正常的生长发育、土壤酶活性、土壤微生物群落结构及数量,土传病害加剧。连作条件下,不同茬口的作物会产生不同种类和数量的化感物质,对后茬其他作物生长产生一定有益或有害的作用,即化感作用^[34]。随着研究的不断深入,还会有新的化感物质及新的作用机理逐渐被发现。

表3 烤烟连作土壤化感物质变化特征

化感物质种类	化感物质变化特征
间苯三酚	连作后间苯三酚含量升高 ^[31-32] ;随连作年限增加,烟田土壤间苯三酚含量由 1.213 mg·kg ⁻¹ 升高至 1.987 mg·kg ⁻¹ ^[22]
阔马酸	连作后阔马酸含量升高 ^[31] ;随连作年限增加,烟田土壤阔马酸含量由 0.050 mg·kg ⁻¹ 升高至 0.134 mg·kg ⁻¹ ^[22]
对羟基苯甲酸	连作后,烟田土壤对羟基苯甲酸含量升高,连作 1 a 含量为 0.127 mg·kg ⁻¹ ,连作 16 a 时增加至 0.467 mg·kg ⁻¹ ^[22] ;连作 1~3 a 平均含量为 64.33 mg·kg ⁻¹ ,连作 4~6 a 平均含量为 70.91 mg·kg ⁻¹ ^[33] ;连作 1 a 时含量为 6.58 mg·kg ⁻¹ ,连作 10 a 平均含量为 19.73 mg·kg ⁻¹ ^[34] ,连作后对羟基苯甲酸含量升高 ^[31-32,35]
香草酸	随连作年限增加,烟田土壤香草酸含量由 0.073 mg·kg ⁻¹ 升高至 0.278 mg·kg ⁻¹ ^[22] ;连作 1~3 a 平均含量为 1.83 mg·kg ⁻¹ 、连作 4~6 a 平均含量为 1.97 mg·kg ⁻¹ ^[33] ;连作 1 a 含量 17.56 mg·kg ⁻¹ ,连作 10 a 平均含量 99.52 mg·kg ⁻¹ ^[34] ,连作后香草酸含量升高 ^[31-32,35]
香兰素	随连作年限增加,烟田土壤香兰素含量由 0.090 mg·kg ⁻¹ 升高至 0.291 mg·kg ⁻¹ ^[22] ,连作后香兰素含量升高 ^[31]
阿魏酸	连作后,烟田土壤阿魏酸含量升高,连作 1 a 含量为 0.032 mg·kg ⁻¹ 、连作 16 a 时增加至 0.318 mg·kg ⁻¹ ^[22] ;连作 1~3 a 平均含量为 30.45 mg·kg ⁻¹ 、连作 4~6 a 平均含量为 31.89 mg·kg ⁻¹ ^[33] ,连作后,阿魏酸含量升高 ^[31-32,35]
苯甲酸	连作后,烟田土壤苯甲酸含量升高,连作 1 a 时含量为 0.046 mg·kg ⁻¹ 、连作 16 a 时增加至 0.071 mg·kg ⁻¹ ^[22] ;连作 1~3 a 平均含量为 10.94 mg·kg ⁻¹ 、连作 4~6 a 平均增加至 12.58 mg·kg ⁻¹ ^[33] ;连作 1 a 时含量为 0.26 mg·kg ⁻¹ 、连作 10 a 增加至 12.36 mg·kg ⁻¹ ^[34] ,连作后,苯甲酸含量升高 ^[32]
肉桂酸	随连作年限增加,烟田土壤肉桂酸含量由 0.024 mg·kg ⁻¹ 升高至 0.008 mg·kg ⁻¹ ^[22] ;连作 1~3 a 平均含量为 2.16 mg·kg ⁻¹ ,连作 4~6 a 平均含量为 3.52 mg·kg ⁻¹ ^[33] ,连作后,肉桂酸含量升高 ^[32,35]

1.2.3 微生物群落结构和多样性 土壤是微生物的大本营,聚居着包括细菌、真菌、放线菌、原生动物和病毒等种类的大量微生物,对土壤中的物质转化、养分循环和能量流动起着至关重要的作用,同时对提高土壤肥力、净化生态环境、调节植物生长发育和抵抗作物病虫害等方面发挥着不可替代的重要作用^[36]。土壤微生物群落结构和多样性的改变是烤烟发生连作障碍的重要原因。研

究表明,连作烟草根系分泌的酚酸类化学物质会导致病原菌数量显著提高,土壤根际微生物多样性和结构平衡性降低,诸如拮抗菌、固氮菌、无机磷细菌、硅酸盐细菌、细菌和真菌等的数量显著减少^[37]。古战朝等^[23]的研究也表明,随着烤烟连作年限的增加,烟田土壤中细菌和真菌比例分别显著降低和显著增加,而放线菌的比例变化没有规律。李鑫等^[24]研究表明,烤烟连作使烟田土壤

细菌和放线菌数量减少,真菌数量增多,致使土壤由高肥的“细菌型”向低肥的“真菌型”转变,而增加的真菌以镰刀菌、青霉菌和立枯丝核菌为主。烤烟连作,主要降低了细菌物种中的氨化细菌、好气性自生固氮菌和好气性纤维素分解菌的数量,不利于土壤中有机氮的矿化、植物氮素营养的转化和土壤中有机质的分解及碳素的循环,引起连作土壤养分失衡,引发连作障碍。烤烟连作后,烟田土壤细菌群落结构遭破坏、细菌群落的多样性降低、真菌群落的丰度增加,增加了烤烟病害的发生机率,病原真菌丰度如肉座菌目和格孢腔菌目增加,而能分解土壤毒素的粪壳菌目丰度则降低。且土壤中的潜在病原真菌如镰刀菌属、链格孢属和柱孢霉属的丰度增加,烤烟发生真菌性病害的风险大幅度增加^[38]。研究表明,作物连作后,有益于植物生长的根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)不断减少^[39-40],而不益于植物生长的根际有害微生物(Deleterious Rhizosphere Bacteria, DRB)不断增加^[41],导致植物发病甚至植株死亡^[42]。烤烟长期连作,使土壤微生物多样性降低,土壤微生物群落结构发生变化,增加土壤病原菌,导致烤烟土传病害的发生,土壤养分匮乏、质量变劣,对植烟土壤生态健康造成负面影响,甚至严重破坏土壤健康^[25,43]。

2 连作障碍防控技术

2.1 培育耐连作烤烟抗性品种

选用耐连作抗性烤烟品种始终是获取高产优质烤烟产品和病虫害综合防治策略中的最佳方法,也是最安全和最经济有效的措施^[44]。尤其是对于一些难以防治的土传病害,例如,烟草黑胫病、烟草青枯病和烟草赤星病等病害,利用抗性品种,是最佳的防治措施。李童等^[45]对云烟 87、云烟 85、云烟 97、贵烟 5 号、贵烟 8 号、韭菜坪 2 号、毕纳 1 号、GZ36、K326 和红花大金元共 10 个烤烟品种(系)的烟草赤星病抗性水平的研究发现,云烟 87、GZ36 和红花大金元的抗性相对较强,可有效降低烟草赤星病的发病率。姜淑祯等^[46]研究发现,接种青枯菌烟株后,抗性品种 633K 的各项生理指标明显优于易感品种红花大金元,抗病

品种能够更有效地响应青枯病菌侵染胁迫并作出生理改变,以此来抵御病原菌的侵染。

2.2 优化种植制度

实行轮作、间作或套作可有效克服由于连续多年种植同一种作物或同一科作物形成的连作障碍,并改善土壤的理化性质和生物学性质,使土壤形成良好结构、养分渐趋均衡、改变土壤微生物群落结构和减少化感自毒物质的形成^[47-49]。研究表明,和连作比较,烤烟轮作和套作能够均衡土壤养分供应,提高土壤酶活性,提高烟叶品质,较好地克服了连作障碍^[50],但在与烤烟轮作、套作和间作的作物选择上尽量不要选择同一科作物,即具有同源病虫害的作物或共患病的作物^[51]。和烤烟长期连作相比,长期轮作烤烟的产量和产值分别增加 19.1%~46.9%和 21.9%~57.6%^[52],白菜、豌豆和绿肥分别与烤烟轮作,均能减少烟田土壤中的病原真菌数,增加有益真菌数^[53]。烤烟与 3 种中草药(藿香、紫苏和菘蓝)间作均能不同程度地均衡土壤养分供应、提高土壤酶活性、增加细菌和放线菌数量、降低真菌数量,促进烤烟生长发育,提高烟叶质量,改善土壤环境,提升经济效益和实现烤烟产业的可持续发展^[54]。与烤烟连作相比,烟麦、烟薯套种可提高土壤酶活性,改善土壤环境、促进烤烟生长发育^[55],烤烟-玉米轮作降低了病害的发生率^[56],烟蒜轮作和套作提高了烟叶产量和品质、改善土壤理化性质和微生物群落结构、提高土壤酶活性,减缓连作障碍^[57]。

2.3 合理施用不同种类肥料制剂

烤烟生产中,由于施肥模式的相对固化和烤烟对养分吸收的数量和比例相对固定,连作放大了养分元素偏好的效应,土壤酸化,土壤养分失衡而引起的连作障碍日趋明显^[58]。研究表明,合理施肥可有效遏制烤烟病虫害(烟蚜虫)的发生^[59];当连作烟田的氮、磷、钾养分为某一合适比例时,黑胫病、青枯病和斑点病病害频率显著降低^[60];常规化学肥料与生物有机肥、微生物菌剂和谷胱甘肽配合施用能有效提高连作烤烟的抗病性^[61];增施微生态制剂可有效提高连作烤烟的产量质量和产值,降低土传病害发生率,烟株黑胫病和根黑

腐病的发病率分别降低 54.59% 和 44.41%, 病情指数分别降低 65.19% 和 55.97%^[62]; 在连作烟田土壤中添加不同微生物菌剂后, 均能提高土壤酶活性, 促进土壤养分循环和增加土壤养分, 促进烟株生长, 消减连作障碍^[63]; 有机肥、中微量营养元素肥料与大量营养元素肥料配施, 可在一定程度上缓解由于作物吸收偏好造成的中微量养分元素缺乏, 保持土壤良好的理化性质, 优化土壤微生物群落结构, 促进土壤健康和增强植物免疫抵抗力^[64-66]。此外, 生物质炭近年来被广泛用来改良连作烟田土壤, 由于其较大的比表面积和孔隙率, 可以有效吸附连作烟田土壤中的有害物质(化感自毒物质), 为微生物提供良好的生存和增殖空间^[67]。有研究表明, 施用烟秆生物质炭基肥可促进连作烤烟生长发育, 降低黑胫病和花叶病的发病率, 提高烤后烟叶外观质量、产量及化学成分协调性^[68], 施用烟秆生物质炭可改善连作烤烟农艺性状、促进烤烟生长发育、提高产量和质量, 有效消减连作障碍, 但过量施用会抑制烤烟生长^[2]。

2.4 连作土壤消毒

烤烟连作之后, 土壤的基本理化性质和生物学性质均会变劣, 化感自毒物质、病原微生物、害虫、杂草或有害土壤动物均较轮作土壤有所增加, 采用物理、化学或生物手段对“病土”(连作土壤)进行处理, 杀灭隐藏在土壤中的病原微生物、害虫、杂草或有害土壤动物的土壤改良措施^[69]。通过土壤消毒的方式可以有效减少其存活量, 降低连作障碍风险。物理消毒方法主要有蒸汽消毒、热处理、电处理和 γ 射线辐射等。对连作烟田进行高温高压灭菌处理, 对大部分病原菌可达到 100% 的致死率, 能显著改善烤烟生长的土壤环境, 促进烤烟正常生长发育^[70]。除物理消毒方法外, 还可采用化学药剂来消毒土壤, 常用的熏蒸剂主要有氯化苦、棉隆、威百亩、二甲基二硫、硫酰氟等。用氯化苦熏蒸连作烟田土壤, 可有效防治烤烟土传病害, 尤其对黑胫病和根结线虫病害的防治效果显著, 但无法清除烟田杂草^[71]。在模拟连作烟田中施用三种化学修复剂, 均能降低烤烟黑胫病 10%~15% 的发病率, 提高约 5% 的产量^[72]。

在连作烟田土壤中施用石灰可有效调节土壤的酸度, 土壤的 pH 平均升高 0.5 个单位, 水解性酸度平均降低了 46%, 土壤酶活性得到提高^[28]。此外, 利用特殊植物释放出的某些气体来杀死土壤中的病菌和害虫等^[73-75], 即生物熏蒸。此方法应用在连作烤烟土壤的消毒上具有经济、环境友好和培肥土壤的优势, 应用前景广阔^[76]。

2.5 生物防治

在实际生产中, 连作土壤土传病害的防治可利用生物方法来防治。生物防治方法主要有解毒和防病两个防治方向, 解毒即通过有益微生物来降解连作土壤中化感自毒物质^[77], 防病即通过改变土壤微生物群落结构来防治土传病害^[78]。在连作黄瓜地接种哈茨木霉菌后, 对黄瓜根系产生的阔马酸、苯甲酸和肉桂酸等 6 种酚酸类化感自毒物质的降解率可达 80%, 显著缓解了连作障碍^[79]。利用多种细菌高效降解连作烤烟根系分泌的自毒物质如对羟基苯甲酸等, 为克服烤烟连作障碍提供了新技术和新思路^[80]。通过接种外源微生物以促进烤烟根际有益微生物群落的繁殖, 抑制病原菌的繁殖, 减少积累, 达到“以菌克菌”的目的^[81]。有益微生物在环境因子(氧气、水等)和营养物质(微量营养元素等)等方面与病原菌竞争, 通过拮抗作用等作用抑制多种病原体的繁殖和生长^[82]。小区试验表明, 接种枯草芽孢杆菌和 2 种短芽孢杆菌后, 对烤烟青枯病的平均防治效果分别为 82.5%、100.0% 和 84.5%^[83]。施用含有短芽孢杆菌的生物有机肥, 可促进烤烟生长和抑制青枯菌的增殖来防治青枯病^[84]。施用含拮抗菌(SQR11)的生物有机肥, 对第一、第二和第三季烤烟青枯病的生物防治率分别达到 47%、69% 和 89% 以上^[85]。相对于不施用哈茨木霉菌剂, 长期连作烟田施用哈茨木霉菌剂可有效提高烤烟根际土壤速效养分含量和酶活性, 提高土壤微生物群落丰度和多样性指数, 提高细菌特有的 OTUs 数, 降低真菌特有的 OTUs 数, 消减连作障碍^[86]。生物防治具有环境友好, 低污染性, 在防治烤烟连作障碍方面具有较好的应用前景, 然而, 生物防治存在的突出问题包括成本偏高

和对其他生物的影响存在不确定性等,同样不容忽视。

3 展望

在当前土地资源非常有限的情况下,高强度复种的模式下不可避免地会引发连作障碍。尽管国内外学者在引起作物连作障碍的原因和消除措施方面开展了大量的研究,但大多数研究都是基于单一地域、单一品种和单一气候环境下开展的相关研究工作,并得到了相关消减烤烟连作障碍的措施,其普适性仍需在以后的生产实践中进一步验证。鉴于以往相关研究的局限性和连作障碍发生原因的复杂性,涉及到烤烟品种本身的抗性、土壤环境、土壤微生物群落结构组成和气候环境等方面的因素,因此其发生机制仍需进一步深入探讨。以下理论和技术措施都需进一步探索和实践:

(1)全面收集烤烟种质资源,选育和选择耐连作广谱性烤烟品种仍是克服连作障碍的根本,只有烟株本身具有优良的抗性,才能最大限度地克服不利的土壤环境和气候环境,减轻连作障碍。

(2)全面系统深入地开展连作烟田土壤环境动态变化规律的研究,土壤理化性质和生物学性质的变化,包括土壤养分含量、土壤酶活性、土壤化感自毒物质、土壤 pH、土壤微生物群落结构组成等的动态变化(如有益微生物和有害微生物间的消长关系等)及其相互影响关系。

(3)开展烤烟连作障碍现有消减技术的进一步探索和实践。烤烟与其他作物进行轮作、间作或套作时,需科学地选择其他作物品种以达到最佳效果;科学筛选微生物菌剂和生物质炭等制剂并合理利用以减轻土传病虫害;科学均衡地搭配施用各类肥料以均衡土壤养分;筛选最简单有效实用的土壤消毒技术措施来构建健康土壤环境;充分利用微生物间的拮抗和协同等效应来防治连作障碍;限于单一消减技术措施的防控效果,需探索综合利用多种技术措施,视气候、生态环境-烤烟植株-土壤为一个相互联系的整体系统来考虑连作障碍发生的原因,以最大限度消减连作障碍。

(4)聚焦连作障碍发生新理论的探寻深化和

消减新技术措施的实践应用。首先,加强对现有连作障碍发生理论和消减技术措施的再实践和再应用,相关理论和技术措施在不同品种、不同地域和不同气候环境条件下指导生产实践的效果,考虑在不同烟区用长期定位试验来验证防控效果;其次,拓展消减烤烟连作障碍新理论和新技术的研究,阐明连作障碍因子间相互作用新机制,并开展生产性应用;最后,加强烤烟连作障碍消减技术的生态环境效益、经济效益和实用性等方面的综合评价,淘汰一些存在成本高昂、操作技术复杂、效果不显著、理论上可行而在生产实践中难以推广使用的技术措施,筛选出一批具有广谱性、成本较低廉、操作相对简单、实用性强、效果显著等优点,广受烟农欢迎的消减技术,能真正在烟田上推广和使用,将对我国烤烟种植业绿色、高效和可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2023 年[M]. 北京:中国统计出版社,2024.
- [2] 孔明,王铎,李杰,等. 烟秆生物质炭对烤烟连作障碍的消减作用初探[J]. 山东农业科学,2021,53(1):87-93.
- [3] LIU S, WANG Z Y, NIU J F, et al. Changes in physico-chemical properties, enzymatic activities, and the microbial community of soil significantly influence the continuous cropping of *Panax quinquefolius* L. (American ginseng) [J]. Plant and Soil, 2021, 463(1): 427-446.
- [4] 张继光,申国明,张久权,等. 烟草连作障碍研究进展[J]. 中国烟草科学,2011,32(3):95-99.
- [5] 高峰. 烤烟连作障碍效应与消减技术初探[D]. 郑州:河南农业大学,2014.
- [6] 马文富,邓小鹏,杜杏蓉,等. 连作年限对植烟土壤化学特性及烟叶产质量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021,36(6):993-999.
- [7] 白羽祥,蒯忠龙,邓小鹏,等. 基于逐步回归模型的连作植烟土壤化学性状和酶活性关系分析[J]. 南方农业学报,2018, 49(12):2387-2393.
- [8] 苏海燕,程传策,马啸,等. 烤烟连作对重庆土壤养分状况的影响[J]. 河南农业科学,2010(12):59-62.
- [9] 杜杏蓉,李运国,邓小鹏,等. 连作对不同类型植烟土壤化学性状、酶活性及细菌群落的影响[J]. 中国烟草科学,2021, 42(5):30-35.
- [10] 张科,袁玲,施炯,等. 不同植烟模式对烤烟产质量、土壤养分和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010, 16 (1):124-128.

- [11] 代方秀,杜杏蓉,李运国,等.烤烟连作下不同植烟土壤化学性状与酶活性变化及其相关性[J].江苏农业科学,2021,49(16):233-239.
- [12] 王棋,徐传涛,王昌全,等.烤烟连作对土壤生态化学计量特征的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(5):702-708.
- [13] 刘楚祺,赵高坤,邓小鹏,等.连作年限对植烟土壤养分和微生物量及胞外酶化学计量特征的影响[J].云南农业大学学报(自然科学版),2023(3):494-502.
- [14] 刘勇成,俞世康,李富程,等.长期连作下石灰性紫色土植烟土壤养分与酶活性变化[J].广东农业科学,2022,49(12):74-81.
- [15] 彭友,陈代荣,阳显斌,等.不同连作年限植烟土壤养分含量分析[J].天津农业科学,2017,23(5):31-34.
- [16] 刘方,何腾兵,刘元生,等.长期连作黄壤烟地养分变化及其施肥效应分析[J].烟草科技,2002,35(6):30-33.
- [17] 蒋潘强.不同连作年限对植烟土壤养分的影响[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- [18] 刘红杰,习向银,刘朝科,等.深翻耕和连作对植烟土壤养分及其生物活性的影响[J].福建农业学报,2011,26(2):298-303.
- [19] 张翼,张长华,王振民,等.连作对烤烟生长和烟地土壤酶活性的影响[J].中国农学通报,2007,23(12):211-215.
- [20] 苏海燕.烤烟连作对土壤理化特性及烟叶品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2011.
- [21] 蔡秋燕,阳显斌,孟祥,等.不同连作年限对植烟土壤性状的影响[J].江西农业学报,2020,32(10):93-98.
- [22] 白羽祥,杨成翠,史普西,等.连作植烟土壤酚酸类物质变化特征及其与主要环境因子的 Mantel Test 分析[J].中国生态农业学报(中英文),2019(3):369-379.
- [23] 古战朝,习向银,刘红杰,等.连作对烤烟根际土壤微生物数量和酶活性的动态影响[J].河南农业大学学报,2011,45(5):508-513.
- [24] 李鑫,张秀丽,孙冰玉,等.烤烟连作对耕层土壤酶活性及微生物区系的影响[J].土壤,2012,44(3):456-460.
- [25] 陈钰栋.连作烟草根系微生态特征与绿色修复措施研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
- [26] 姜翼来,关连珠,王玲莉,等.不同植烟年限土壤 pH 和酶活性的变化[J].植物营养与肥料学报,2007,13(3):531-534.
- [27] 符建国,贾志红,沈宏.植烟土壤酶活性对连作的响应及其与土壤理化特性的相关性研究[J].安徽农业科学,2012,40(11):6471-6473.
- [28] 于宁,关连珠,姜翼来,等.施石灰对北方连作烟田土壤酸度调节及酶活性恢复研究[J].土壤通报,2008,39(4):849-851.
- [29] 焦永吉,程功,马永健,等.烟草连作对土壤微生物多样性及酶活性的影响[J].土壤与作物,2014,3(2):56-62.
- [30] 何川,刘国顺,李祖良,等.连作对植烟土壤有机碳和酶活性的影响及其与土传病害的关系[J].河南农业大学学报,2011,45(6):701-705.
- [31] 白羽祥,史普西,杨成翠,等.连作植烟土壤酚酸类物质积累特征及其相互作用关系分析[J].中国土壤与肥料,2019(3):22-28.
- [32] 黄容,王永豪,王昌全,等.凉攀区植烟土壤酚酸类物质的含量分布和变异特征[J].土壤,2021,53(4):794-801.
- [33] 王永豪.凉攀烟区植烟土壤酚酸类化感物质积累特征及其影响因素[D].雅安:四川农业大学,2016.
- [34] 孙敬国,王昌军,孙光伟,等.连作年限对植烟根际土壤化感物质积累的影响:以湖北黄棕壤烟田为例[J].土壤,2021,53(1):148-153.
- [35] 杨敏,和明东,段杰,等.生物炭对连作烤烟根际土壤酚酸类物质及微生物群落结构的影响[J].福建农业学报,2020,35(1):103-110.
- [36] 胡正嘉.农业微生物[M].北京:农业出版社,1982.
- [37] 刘艳霞,李雨,李想,等.烤烟根际土壤微生物对根系酚酸类物质的响应[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1373-1382.
- [38] 王胜男.西南山区烤烟连作对土壤微生物多样性的影响及机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [39] PII Y, MIMMO T, TOMASI N, et al. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(4):403-415.
- [40] PUGA-FREITAS R, BLOUIN M. A review of the effects of soil organisms on plant hormone signalling pathways [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 114:104-116.
- [41] CASTELLANOS S DE, GIGON A, PUGA-FREITAS R, et al. Combined effects of earthworms and IAA-producing rhizobacteria on plant growth and development [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 80: 100-107.
- [42] XU X M, PASSEY T, WEI F, et al. Amplicon-based metagenomics identified candidate organisms in soils that caused yield decline in strawberry [J]. Horticulture Research, 2015, 2: 15022.
- [43] BAI Y X, WANG G, CHENG Y D, et al. Soil acidification in continuously cropped tobacco alters bacterial community structure and diversity via the accumulation of phenolic acids[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12499.
- [44] ZENG J M, NIFONG J, LIU Y, et al. Evaluating diverse systems of tobacco genetic resistance to *Phytophthora nicotianae* in Yunnan, China[J]. Plant Pathology, 2019, 68(9): 1616-1623.
- [45] 李童,郭沫言,章松柏,等.10 个烤烟品种(系)对烟草赤星

- 病的抗性评价[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(6): 68-73.
- [46] 姜淑祯, 宋文静, 杨波, 等. 不同烤烟品种对青枯病胁迫的生理响应及抗性分析[J]. 中国烟草科学, 2022, 43(6): 25-30.
- [47] DU L T, HUANG B J, DU N S, et al. Effects of garlic/cucumber relay intercropping on soil enzyme activities and the microbial environment in continuous cropping [J]. HortScience, 2017, 52(1): 78-84.
- [48] GAO Z Y, HAN M K, HU Y Y, et al. Effects of continuous cropping of sweet potato on the fungal community structure in rhizospheric soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2269.
- [49] ZENG J R, LIU J Z, LU C H, et al. Intercropping with turmeric or ginger reduce the continuous cropping obstacles that affect *Pogostemon cablin* (patchouli) [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 579719.
- [50] 贾健, 朱金峰, 杜修智, 等. 不同种植模式对土壤酶、烤烟生长及烟叶致香成分的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 141-149.
- [51] CHONGTHAM I R, BERGKVIST G, WATSON C A, et al. Factors influencing crop rotation strategies on organic farms with different time periods since conversion to organic production[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2017, 33(1): 14-27.
- [52] 肖庆亮. 长期种植与施肥模式耦合下的烟地生产力和氮钾养分状况[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [53] 张邦喜, 顾小凤, 张萌, 等. 轮作对贵州烤烟农艺和经济性状及真菌群落结构的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(9): 81-87.
- [54] 王怡然. 烤烟与三种中草药间作对土壤生物学性状及烟叶品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [55] 张迪, 李冬, 李俊营, 等. 种植模式对土壤酶活性与烤烟光合特性的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(2): 250-252, 277.
- [56] 王亚麒. 长期种植施肥模式对烟地生产力和养分状况的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [57] 阳显斌. 烟蒜轮(套)作对植烟土壤连作障碍减缓作用及机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [58] LIU Y, JIANG Y, WANG G, et al. Effect of different continuous cropping years on tobacco-growing soils physical and chemical properties and microflora[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(13): 136-140.
- [59] POLAT AKKÖPRÜ E. Effects of liquid vermicompost and synthetic NPK fertilizer sources on *Myzus persicae* Sulzer (Aphididae: Hemiptera) fed on tobacco[J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2021, 128(3): 789-798.
- [60] 白志高, 龙怀玉, 陈发荣, 等. 烟稻连作田施用不同氮磷钾配比肥料对烤烟抗病性的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(2): 424-425, 448.
- [61] 郭山虎, 武忠明, 王永平, 等. 施肥措施对烤烟连作障碍的消减作用初探[J]. 中国农学通报, 2023, 39(19): 9-15.
- [62] 李倩, 张常兴, 程玉渊, 等. 微生物制剂对烤烟连作土壤酶活性及其产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(1): 43-48.
- [63] 姜永雷, 肖雨, 邓小鹏, 等. 微生物菌剂对烟草连作土壤理化性质及土壤胞外酶酶活性的影响[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(4): 59-66.
- [64] RAHIMI A, SIAVASH MOGHADDAM S, GHIYASI M, et al. The influence of chemical, organic and biological fertilizers on agrobiological and antioxidant properties of Syrian *Cephalaria* (*Cephalaria syriaca* L.) [J]. Agriculture, 2019, 9(6): 122.
- [65] DUBEY R K, DUBEY P K, CHAURASIA R, et al. Sustainable agronomic practices for enhancing the soil quality and yield of *Cicer arietinum* L. under diverse agroecosystems[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110284.
- [66] WANG S N, CHENG J K, LIAO Y C. Fertilization model for flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in south-west China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(6): 7853-7863.
- [67] WANG H H, REN T B, YANG H J, et al. Research and application of biochar in soil CO₂ emission, fertility, and microorganisms: a sustainable solution to solve China's agricultural straw burning problem [J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1922.
- [68] 陈燕, 王铎, 李杰, 等. 烟秆生物质炭基肥对连作烤烟生长及质量的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6): 129-135.
- [69] 石璐荣. 生物炭与枯草芽孢杆菌 XF-1 对大白菜产量品质及土壤性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [70] 饶德安. 烤烟连作土壤的修复技术及其应用效果研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [71] 王海涛, 陈玉国, 王省伟, 等. 氯化苦土壤熏蒸防治烟田杂草及土传病害效果研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 244-248.
- [72] 田伟, 李云平, 杨超, 等. 植烟土壤根系分泌物障碍的化学原位修复研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 98-102.
- [73] 王晓芳. 万寿菊生物熏蒸对苹果连作障碍缓解效果及其机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [74] GHONAME A A, RIAD G S, EL-BASSIONY A M M, et al. Biofumigation with fresh manure or Brassicaceae residuals could be a promising methyl bromide alternative in head lettuce production[J]. Gesunde Pflanzen, 2017, 69(1): 29-37.

[75] 孙迪,贺依琳,沈丹宇,等. 芥菜生物熏蒸对烟草疫霉菌的抑制作用[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(4): 567-576.

[76] 张大琪,颜冬冬,方文生,等. 生物熏蒸:环境友好型土壤熏蒸技术[J]. 农药学学报,2020,22(1):11-18.

[77] LIU K, McINROY J A, HU C H, et al. Mixtures of plant-growth-promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple plant diseases and plant-growth promotion in the presence of pathogens[J]. Plant Disease, 2018, 102(1): 67-72.

[78] WU Y C, CAI P, JING X X, et al. Soil biofilm formation enhances microbial community diversity and metabolic activity[J]. Environment International, 2019, 132: 105116.

[79] CHEN L H, YANG X M, RAZA W, et al. *Trichoderma harzianum* SQR-T037 rapidly degrades allelochemicals in rhizospheres of continuously cropped cucumbers [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 89(5): 1653-1663.

[80] 扈雪琴. 细菌代谢烟草自毒物质 4-羟基苯甲酸的研究进展[J]. 植物医生,2020,33(5):28-31.

[81] SHEN H, YAN W H, YANG X Y, et al. Co-occurrence network analyses of rhizosphere soil microbial PLFAs and metabolites over continuous cropping seasons in tobacco [J]. Plant and Soil, 2020, 452(1): 119-135.

[82] LANDA B B, MAVRODI O V, RAAIJMAKERS J M, et al. Differential ability of genotypes of 2, 4-diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas fluorescens* strains to colonize the roots of pea plants [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(7): 3226-3237.

[83] 尹华群,易有金,罗宽,等. 烟草青枯病内生拮抗细菌的鉴定及小区防效的初步测定[J]. 中国生物防治,2004,20(3):219-220.

[84] 陈巧玲,胡江,汪汉成,等. 生物有机肥对盆栽烟草根际青枯病原菌和短短芽孢杆菌数量的影响[J]. 南京农业大学学报,2012,35(1):75-79.

[85] 宋松,孙莉,石俊雄,等. 连续施用生物有机肥对烟草青枯病的防治效果[J]. 土壤,2013,45(3):451-458.

[86] 王政,刘久羽,李智,等. 施用不同有益菌剂对长期连作烤烟根际土壤微生态的影响[J]. 西南农业学报,2024,37(3):612-621.

Research Progress on Characteristics of Continuous Cropping Flue-Cured Tobacco Soil and Prevention and Control Technology of Continuous Cropping Obstacle

TANG Hong^{1,2}, WANG Jianwei¹, ZENG Zhangquan³, LIU Lunpei¹, RUAN Yunfei¹, LIANG Chunhua¹, LENG Lijuan¹

(1. School of Science, Kaili University, Kaili 556011, China; 2. School of Chemistry and Bioengineering, Hechi University/Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Applied Intelligent Technology / Guangxi Collaborative Innovation Center of Modern Sericulture and Silk / Guangxi Colleges Universities Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Microbial and Botanical Resources, Hechi 546300, China; 3. Hunan Academy of Forestry / Hengshan Research Station of Forest Ecosystem, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to further elucidate the occurrence mechanism of continuous cropping obstacles of flue-cured tobacco and scientifically selecting comprehensive prevention and control measures, hope for minimizing the continuous cropping obstacles of flue-cured tobacco and realizing the green, efficient and sustainable development of tobacco planting in China. The characteristics of continuous flue-cured tobacco soil were reviewed from the aspects of physical and chemical properties, enzyme activity, allelopathic substances and changes, microbial community structure and diversity in continuous flue-cured tobacco soil. The current prevention and control measures of continuous cropping obstacles of flue-cured tobacco in China were summarized from the aspects of cultivating resistant varieties, optimizing planting system, rational application of different kinds of fertilizer preparations, soil disinfection and biological control, and the future research direction and the latest development direction of prevention and control technology were prospected.

Keywords: flue-cured tobacco; continuous cropping obstacle; prevention and control technology; characteristics of continuous cropping soil