

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22145

土壤强还原处理对连作白菜根肿病的防治效果研究

张智浩¹, 解国玲¹, 吴流通¹, 徐权杰¹, 张永慧², 张继来¹,
林 春³, 邓毅书⁴, 张乃明^{1, 5}, 苏友波^{1*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 甘肃省临夏州康乐县农业农村局, 甘肃 临夏 731500; 3. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201; 4. 云南农业大学建筑工程学院, 云南 昆明 650201; 5. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南 昆明 650201)

摘 要: 探究强还原土壤处理(RSD)对设施白菜连作土壤障碍因子的消减作用, 为丰富绿色有效、环境友好的十字花科作物根肿病防治策略提供理论依据。设置土壤不作任何处理(CK1), 土壤仅淹水并覆膜(CK2), 添加沼液的RSD处理(向土壤中添加沼液至最大田间持水量并覆膜, BS), 添加豆糠的RSD处理(向土壤中均匀添加20 t/hm²的豆糠后灌溉至最大田间持水量并覆膜, SS_RSD), 生物炭修复(向土壤中均匀添加5 t/hm²生物炭后灌溉至最大田间持水量并覆膜, BC), 棉隆熏蒸(向土壤中均匀添加0.5 t/hm²棉隆, 灌溉至最大田间持水量的60%~70%并覆膜, DZ), 并比较各处理对白菜根肿病发病率、产量、连作土壤理化性质和酶活性的变化。连续两茬试验结果表明, 与CK1处理相比, CK2和DZ处理后, 产量分别提高1.71%~2.71%和18.74%~25.51%, 发病率分别降低15.32%~18.33%和53.33%~73.65%; BS和BC处理后, 发病率分别下降21.32%~45.00%和35.00%~35.99%, 产量分别增加13.19%~15.07%和14.26%~19.90%; SS_RSD对白菜根肿病防治效果达76.89%~79.31%, 使白菜根肿病发病率显著降低60.00%~66.99%, 产量显著增加24.25%~27.96%, 且提高了土壤有机质、全氮、有效磷含量和土壤脲酶、磷酸酶活性。因此, RSD是一种具有快速消减设施白菜连作障碍, 实现设施土壤资源健康高效利用的有效措施。

关键词: 土壤强还原处理; 白菜根肿病; 产量; 土壤理化性质; 酶活性

大白菜(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)为十字花科芸苔属两年生草本植物, 是我国的特产蔬菜之一, 广泛分布于两广和云南等地^[1]。在耕地土壤资源缺乏和社会需求不断增加的双重压力下, 驱动了白菜生产形成规模化和集约化的种植模式。然而, 长期高强度单一的白菜种植模式以及不合理的养分管理导致土壤连作障碍问题日益突出, 特别是白菜土传根肿病发生严重, 因根肿病的流行白菜每年减产20%, 严重时可达70%, 甚至绝产绝收^[2]。白菜根肿病是由芸薹根肿菌(*Plasmodiophora brassicae* Woron.)侵染引起的土传植物病害, 该病原菌属专性寄生, 在无寄主植物存在时, 其休眠孢子仍能在

土壤中存活达15年之久, 环境适宜时休眠孢子萌发释放初级游动孢子侵染根毛进而侵染根皮内部形成肿根。肿根的形成会阻碍白菜水分和养分的吸收, 从而导致植株萎蔫和发育不良, 继而导致白菜产量和品质下降^[2-4]。

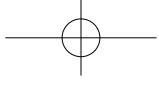
目前, 生产上防控白菜根肿病的主要措施包括农艺措施、物理防治、化学防治和生物防治^[5]。与非十字花科作物轮作是防治白菜根肿病的传统措施, 但轮作会限制白菜产业的稳定发展且短期内抑菌和防病效果均不佳, 长期轮作已不符合集约化农业对土壤资源的需求。而向土壤撒施生石灰以通过调高土壤pH来防控白菜根肿病虽有一定的效果, 但会导致土壤中大量交换性钙镁累积^[6]。化学杀菌剂、棉隆等熏蒸剂^[7-8]的使用对根肿病往往能起较稳定的杀菌效果, 但由于使用频次高、施用量大和杀菌广谱等特点, 往往不利于土壤生态平衡^[9]。向白菜连作土壤中添加拮抗微生物对防治白菜根肿病具有一定的效果, 但外源微生物添加面临与土著微生物竞争营养、生态位等问题, 加之设施大棚内复

收稿日期: 2022-03-16; 录用日期: 2022-06-08

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目子课题(202002AE320005-01-04); 第十四届云南农业大学学生科技创新创业行动基金(2021ZKX122)。

作者简介: 张智浩(1997-), 在读硕士研究生, 从事耕地土壤资源利用与保护研究。E-mail: 1481799152@qq.com。

通讯作者: 苏友波, E-mail: youbosu@ynau.edu.cn。



杂的气候环境条件使得防治效果不稳定。这些方法和技术大多针对某一特殊问题,虽具有一定的防治或缓解连作障碍的效果,但这些方法作用单一,常常不能解决多因素成因的连作障碍问题。因此,探索白菜根肿病的绿色综合防控措施对于实现化肥农药“双减”,支撑白菜产业绿色可持续发展具有重要的现实意义。

强还原土壤处理(RSD)在国外又称厌氧土壤灭菌或生物土壤灭菌,是一种作物种植前的土壤处理方法^[10]。此法具有广谱性、综合性、环境友好、易操作和处理时间短等特点,目前在日本、荷兰和美国已广泛应用于土壤灭菌,在修复连作退化土壤上具有很好的应用前景^[11]。据报道,RSD后的根结线虫致死率几乎可达到100%,对真菌和细菌类病原菌的致死率可达90%以上,甚至达到99%以上^[12]。强还原土壤处理已被用于多种土传病害防治,如生菜根结线虫^[11],卷心菜菌核病^[10],桔梗枯萎病^[13],西瓜枯萎病^[14]等,然而,用于防治白菜根肿病的研究鲜有报道。因此,本研究以云南省大理白族自治州祥云县刘厂镇的白菜生产基地根肿病爆发严重田块为研究对象,研究固体有机物料和液体有机物料强还原处理对白菜连作产量、根肿病发病率及土壤理化性

质和酶活性的影响,旨在寻求一种快速解决白菜忌连作问题,提高土壤资源的利用效率并保证白菜的可持续生产及其品质的方法,为白菜等十字花科作物可持续生产提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于大理白族自治州祥云县刘厂镇龙之源蔬菜有限责任公司蔬菜生产基地(25°28′37.34″N,100°45′15.84″E),属暖温带高原季风气候,干湿季分明。年平均气温15.2℃,年均降水751 mm,年日照时数长,日照2327.05 h,土地复种指数高,试验前该基地已连续7年种植白菜,土壤连作障碍发生严重。目前该基地通过白菜-油菜-白菜的轮作模式来防治根肿病,但效果不明显,白菜仍深受根肿病的影响,且存在减产、品质下降等问题。试验中所用白菜品种为“寒玉快菜”,通过幼苗移栽开展连续2茬的田间试验。猪粪源沼液和豆糠从当地养猪场及农户收集,土壤熏蒸剂购买自浙江海正化工股份有限公司(有效成分:棉隆≥98%)。供试田块土壤基本理化性质见表1,供试有机物料基本理化性质见表2。

表1 供试土壤基本理化性质

pH值	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	碱解氮(mg/kg)	电导率(μS/cm)
7.37	27.02	1.53	172.22	377.90	245	744

表2 供试有机物料的基本性质

物料	全碳(g/kg)	全氮(g/kg)	碳氮比
豆糠	447.46	15.58	28.72
生物炭	74.60	1.50	49.73
沼液	7.49	1.73	4.34

1.2 试验设计

田间试验共设置6个处理,对照1(土壤不作任何处理,CK1),对照2(灌溉至最大田间持水量并覆膜,CK2),沼液处理(向土壤中添加200 t/hm²的沼液至最大田间持水量并覆膜,BS),添加豆糠的RSD处理(向土壤中添加20 t/hm²的豆糠后灌溉至最大田间持水量并覆膜,SS_RSD),生物炭修复(向土壤中添加5 t/hm²生物炭后灌溉至最大田间持水量并覆膜,BC),棉隆熏蒸(向土壤中

均匀添加0.5 t/hm²棉隆,灌溉至最大田间持水量的60%~70%,并覆膜,DZ)。每个处理3次重复,共18个小区,每个小区24 m²(6 m×4 m),试验小区采用随机区组排列。土壤处理结束后采用育苗移栽的方式进行白菜栽培,白菜生长期间,各小区浇水、中耕、除草等同一农艺措施同一天完成,其余田间管理措施均按当地白菜栽培习惯进行。

栽培前土壤预处理:处理前平整土地,将沼液、豆糠、生物炭均匀喷(撒)施于小区土壤表面。豆糠保持厚约5 cm,用旋耕机旋翻0~20 cm耕层土壤,使有机物料与土壤混合均匀。灌溉至最大田间持水量,即一次性灌足水,直至土层完全饱和,棉隆均匀喷施于土壤表面(灌溉至最大田间持水量的60%~70%,并覆膜),对照仅做常规旋耕处理。延大棚延伸方向覆盖0.1 mm的农用薄膜,

严禁漏气, 封闭设施大棚, 处理期间, 土壤温度为 30 ~ 40℃。处理 30 d 后揭膜通风, 排水晾干并充分疏松土壤, 一般 3 ~ 7 d 即可再植, 之后田间管理按当地习惯进行。

1.3 土壤样品采集

分别于处理前、处理后按 5 点取样法采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤, 将各小区 5 个土样混合为 1 个代表样并剔除植物残根和石砾等杂质后装入自封袋。土样迅速转移至实验室, 一部分自然风干后分别过 2、1 和 0.149 mm 筛用于测定土壤 pH 值、土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和电导率等土壤理化性质, 另一部分土壤于 4℃ 冰箱保存, 后续用于土壤酶活性分析。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤 pH、电导率、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等理化性质按《土壤农化分析》^[15] 方法进行测定; 土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性按《土壤酶及其研究法》^[16] 测定。

1.5 白菜产量和根肿病发病率的测定

白菜收获时, 将各小区内全部大白菜连根拔起, 用自来水将根部清洗干净, 进行病情分级调查, 计算发病率、病情指数和防治效果。各处理的产量按小区内实测统计, 以各小区为单位计算产量, 记录各小区内白菜生物量、地上部分和根部鲜重。白菜根肿病病情分级按 Siemens 等^[17] 的 4 级分级标准进行分级: 0 级, 没有附着根肿; 1 级, 根肿只附着在侧根上, 根肿数量占根系全部的 1% ~ 25%; 2 级, 主根上有根肿附着, 侧根上根肿数量占根系全部的 25% ~ 49%; 3 级, 主根上有根肿附着, 根肿数量占根系全部的 50% ~ 75%; 4 级, 主根上有根肿附着, 根肿数量占根系全部的 75% 以上。

发病率、病情指数和防治效果分别按以下公式计算:

$$\text{发病率}(\%) = \frac{\text{发病株数}}{\text{调查总数}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{病情指数}(\%) = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{相对级数值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级数值}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{防治效果}(\%) = \frac{\left(\frac{\text{对照区病情指数} - \text{处理区病情指数}}{\text{对照区病情指数}} \right) \times 100}{\quad} \quad (3)$$

1.6 数据统计分析

数据采用 Excel 2016 计算平均值与标准差, 用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析和 LSD 法多重比较检验处理间的差异显著性 ($P < 0.05$), 并分析根肿病发病率、土壤基本理化性质 Pearson 相关性, 采用 Excel 2016 及 Origin 2018 制表及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤处理对白菜产量和根肿病发病率的影响

与 CK1 处理相比, BS、SS_RSD、BC、DZ 处理后均增加了白菜单株生物量 (表 3)。其中第一茬 SS_RSD 处理使白菜生物量增幅最大, 达 20.65%, 其次为 DZ 处理, 增幅 19.57%, BS 和 BC 处理分别使白菜单株生物量增加 13.04% 和 3.26%。BS、SS_RSD、BC、DZ 处理增加了白菜单株地上部鲜重, 增幅分别为 13.48%、22.47%、3.37%、21.35%。各处理均增加了白菜生物产量和经济产量, 其中 SS_RSD 处理使得白菜生物产量和经济产量分别增加 24.25% 和 22.47%, DZ 处理使得白菜生物产量和经济产量分别增加 18.74% 和 21.35%, CK2、BS、BC 处理白菜生物产量和经济产量的增幅分别为 1.71% ~ 19.90% 和 3.37% ~ 13.48%。第二茬处理对白菜产量的影响与第一茬表现出相同的趋势, 与 CK1 相比, CK2、BS、SS_RSD、BC、DZ 分别使白菜单株生物量提高 2.20%、13.19%、20.88%、15.38%、20.88%。连续两茬土壤处理后 CK2、BS、SS_RSD、BC、DZ 处理较 CK1 处理均提高白菜产量, 其中 SS_RSD 处理对白菜生物产量增幅最大, 达 27.96%。DZ、BC、BS 处理白菜生物产量的增幅分别为 25.51%、14.26%、13.19%, 且处理间差异均达显著水平。SS_RSD 处理较 CK1 处理使白菜平均每公顷经济产量提高 28.77%, 其次为 DZ 处理, 提高 24.19%, 其余处理对白菜平均每公顷经济产量增幅为 2.64% ~ 13.98%。结果表明, 连续两茬处理后, SS_RSD 和 DZ 处理较其他处理显著提高了白菜生物产量和经济产量且效果较为稳定。

与 CK1 处理相比, CK2、BS、SS_RSD、BC、DZ 处理均降低了白菜根肿病发病率, 减轻白菜根肿病严重程度, 各处理对白菜根肿病防治效果由高到低第一茬为 SS_RSD>DZ>BC>BS>CK2、第二茬为 SS_RSD>DZ>BS>BC>CK2 (表 4)。其中, SS_RSD 处理后白菜根肿病发病率为 20.00% ~



表 3 不同处理对白菜鲜重及产量的影响

		平均单株产量（kg/ 株）			产量（t/hm ² ）		
	处理	生物量	地上部鲜重	根鲜重	生物产量	经济产量	经济产量较对照增幅 （ % ）
第一茬	CK1	0.92 ± 0.10a	0.89 ± 0.11bc	0.03 ± 0.01ab	114.14 ± 2.70f	109.07 ± 0.30e	—
	CK2	0.78 ± 0.18b	0.74 ± 0.18c	0.03 ± 0.01a	116.09 ± 2.70e	112.79 ± 0.30d	3.41
	BS	1.04 ± 0.07a	1.01 ± 0.06ab	0.02 ± 0.00ab	131.34 ± 2.67d	123.77 ± 0.67c	13.48
	SS_RSD	1.11 ± 0.11a	1.09 ± 0.10a	0.01 ± 0.00b	141.82 ± 1.53a	133.58 ± 0.88a	22.47
	BC	0.95 ± 0.05a	0.92 ± 0.05abc	0.02 ± 0.00ab	136.86 ± 2.64b	112.75 ± 1.20d	3.37
	DZ	1.10 ± 0.06a	1.08 ± 0.06a	0.02 ± 0.00ab	135.54 ± 1.76c	132.35 ± 0.67b	21.35
第二茬	CK1	0.91 ± 0.04b	0.87 ± 0.03c	0.04 ± 0.01a	116.08 ± 1.02f	111.32 ± 0.89f	—
	CK2	0.93 ± 0.09b	0.90 ± 0.09bc	0.04 ± 0.00a	119.23 ± 1.65e	114.26 ± 1.49e	2.64
	BS	1.03 ± 0.11ab	0.99 ± 0.11abc	0.04 ± 0.00a	131.39 ± 1.68d	126.67 ± 1.09d	13.79
	SS_RSD	1.10 ± 0.10a	1.07 ± 0.10a	0.04 ± 0.00a	148.54 ± 1.68a	143.35 ± 1.06a	28.77
	BC	1.05 ± 0.04ab	0.99 ± 0.03abc	0.05 ± 0.03a	132.54 ± 1.01c	126.88 ± 1.24c	13.98
	DZ	1.10 ± 0.05a	1.04 ± 0.08ab	0.06 ± 0.03a	145.70 ± 1.67b	138.25 ± 0.87b	24.19

注：表中数值为 3 次重复测定的均值 ± 标准误；同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，相同字母表示差异不显著。下同。

表 4 不同处理对白菜根肿病发病率、病情指数和防治效果的影响 (%)

	处理	发病率	病情指数	防治效果
第一茬	CK1	90.32 ± 0.08a	61.30 ± 0.06a	—
	CK2	75.00 ± 0.43b	57.36 ± 0.31a	6.42
	BS	69.00 ± 0.07c	47.67 ± 0.10b	22.24
	SS_RSD	23.33 ± 0.10e	14.17 ± 0.01d	76.89
	BC	54.33 ± 0.17d	41.89 ± 0.20c	31.66
	DZ	16.67 ± 0.10f	14.17 ± 0.08d	76.89
第二茬	CK1	80.00 ± 0.05a	60.42 ± 0.08a	—
	CK2	61.67 ± 0.15b	49.17 ± 0.05b	18.62
	BS	35.00 ± 0.05c	28.89 ± 0.12d	52.18
	SS_RSD	20.00 ± 0.13e	12.50 ± 0.14e	79.31
	BC	45.00 ± 0.10d	31.67 ± 0.14c	47.59
	DZ	26.67 ± 0.08e	13.33 ± 0.10e	77.93

23.33%，DZ 处理后白菜根肿病发病率为 16.67% ~ 26.67%，与 CK1 相比，SS_RSD、DZ 处理分别使白菜根肿病发病率下降 60.00% ~ 66.99%、53.33% ~ 73.65%，病情指数分别降低 47.13% ~ 47.92%、47.07% ~ 47.13%。CK2、BS 和 BC 处理白菜根肿病发病率较 CK1 分别降低 15.32% ~ 18.33%、21.32% ~ 45.00% 和 35.00% ~ 35.99%，使白菜根

肿病病情指数分别降低 3.95% ~ 11.25%、13.63% ~ 31.53% 和 19.41% ~ 28.75%。各处理两茬试验结果在防治白菜根肿病上表现出相同的趋势，SS_RSD、DZ 处理对白菜根肿病防治效果最好，第一茬和第二茬防治效果分别为 76.89%、76.89% 和 79.31%、77.93%；其次为 BC 和 BS 处理，BC 处理第一茬和第二茬对白菜根肿病的防治效果分别为 31.66% 和

47.59%，BS 处理第一茬和第二茬对白菜根肿病的防治效果分别为 22.24% 和 52.18%；CK2 处理对白菜根肿病的防治效果较低，第一茬和第二茬分别为 6.42% 和 18.62%。

2.2 不同土壤处理对土壤理化性质的影响

由表 5 可知，第一茬土壤处理后，SS_RSD、BS、BC、DZ 处理相较 CK1 处理土壤 pH 值略微下降；BS、SS_RSD 处理土壤有机质含量相较 CK1 处理分别显著增加 18.32%、47.56%；BS、SS_RSD、BC 和 DZ 处理土壤全氮含量相较 CK1 处理分别增加 18.52%、47.41%、14.81% 和 18.52%；SS_RSD 处理土壤有效磷含量较 CK1 处理提高 10.00%，CK2、BS、BC 和 DZ 处理后土壤有效磷含量有所下降；CK2、BS、BC、SS_RSD、DZ 处理土壤碱解氮、速效钾含量与 CK1 相比无显著差异；除 BS 和 DZ 处理外，CK2、SS_RSD 和 BC 处理土壤电导率相较 CK1 处理分别降低 142.61%、23.93% 和 29.17%；

与 CK1 处理相比，CK2、BS、SS_RSD、BC 和 DZ 处理土壤氧化还原电位分别降低 106.17、109.73、119.40、76.23 和 91.13 mV。第二茬土壤处理后，各处理土壤 pH 值、碱解氮含量与 CK1 处理相比差异不显著；BS、SS_RSD 和 BC 处理土壤有机质含量相较 CK1 处理分别显著增加 40.84%、65.50% 和 15.54%，CK2 处理土壤有机质含量相较 CK1 处理降低 19.25%，DZ 处理土壤有机质含量与 CK1 处理相比无显著差异；BS、SS_RSD、BC 和 DZ 处理土壤全氮含量相较 CK1 处理分别显著增加 41.02%、98.95%、15.79% 和 20.00%，CK2 处理土壤全氮含量与 CK1 处理无显著差异；除 BS 和 DZ 处理外，CK2、SS_RSD 和 BC 处理土壤电导率较 CK1 处理分别降低 145.58%、28.39% 和 50.75%；CK2、BS、SS_RSD、BC 和 DZ 处理土壤氧化还原电位较 CK1 处理分别降低 88.00、116.03、120.60、74.97 和 104.83 mV。

表 5 不同处理对白菜根肿病土壤理化性质的影响

	处理	pH 值	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	电导率 (μS/cm)	氧化还原电位 (mV)
第一茬	CK1	7.38 ± 0.05a	27.02 ± 2.98c	1.35 ± 0.40c	217.00 ± 37.04a	145.13 ± 17.03b	271.11 ± 15.88a	744.00 ± 0.57bc	63.50 ± 3.70a
	CK2	7.40 ± 0.23a	20.47 ± 4.45d	1.02 ± 0.70d	193.67 ± 29.14a	105.45 ± 25.96cd	283.29 ± 9.68a	306.67 ± 0.01e	-42.67 ± 15.11cd
	BS	6.88 ± 0.11b	31.97 ± 1.50b	1.60 ± 0.23b	203.00 ± 24.25a	121.90 ± 55.13c	309.95 ± 40.50a	1035.67 ± 0.39a	-46.23 ± 13.36cd
	SS_RSD	7.35 ± 0.33a	39.87 ± 2.90a	1.99 ± 0.06a	217.00 ± 21.24a	159.65 ± 22.87a	281.88 ± 35.34a	600.33 ± 0.19cd	-55.90 ± 18.42d
	BC	6.98 ± 0.26b	31.01 ± 2.22bc	1.55 ± 0.11bc	235.67 ± 8.06a	113.43 ± 7.65c	285.34 ± 54.08a	576.00 ± 5.19d	-12.73 ± 10.51b
	DZ	6.92 ± 0.18b	28.69 ± 2.19bc	1.60 ± 0.06b	212.33 ± 16.17a	100.61 ± 40.18cd	242.52 ± 51.60a	753.00 ± 2.52b	-27.63 ± 6.63bc
第二茬	CK1	7.10 ± 0.11a	38.03 ± 2.10d	1.90 ± 0.02e	118.53 ± 15.45b	131.14 ± 7.17bc	474.21 ± 11.82c	704.00 ± 0.01bc	59.30 ± 1.67a
	CK2	7.13 ± 0.24ab	31.89 ± 4.01e	1.91 ± 0.04e	108.27 ± 24.56b	126.04 ± 26.36c	436.11 ± 36.77c	286.67 ± 0.03e	-28.70 ± 0.03c
	BS	7.15 ± 0.04a	53.56 ± 10.81b	2.68 ± 0.11b	147.47 ± 10.38ab	138.00 ± 26.46b	624.81 ± 45.34a	975.67 ± 0.40a	-56.73 ± 0.03e
	SS_RSD	7.69 ± 0.36a	62.94 ± 18.16a	3.78 ± 0.06a	159.60 ± 26.22ab	146.92 ± 2.85a	582.69 ± 17.98ab	548.33 ± 0.19cd	-61.30 ± 0.01f
	BC	7.20 ± 0.14a	43.94 ± 14.92c	2.20 ± 0.01d	123.20 ± 19.40a	147.50 ± 2.50a	509.12 ± 61.98bc	467.00 ± 0.73d	-15.67 ± 0.04b
	DZ	6.89 ± 0.04b	38.07 ± 8.93d	2.28 ± 0.01c	130.67 ± 36.00ab	129.91 ± 4.68c	488.06 ± 69.43c	723.00 ± 0.63b	-45.53 ± 0.13d

土壤处理期间，土壤温度在 22.0 ~ 30.5 ℃之间，平均温度为 26.25℃，膜下温度在 22.03 ~ 62.17 ℃之间，平均温度为 42.10℃。不同处理平均土壤温度从高到低依次为 SS_RSD>BC>DZ>CK2>BS>CK1，不同处理平均膜下温度从高到低依次为 SS_RSD>DZ>BC>CK2>BS>CK1。对各处理土壤温度和膜下温度进行监测，发现一天当中土壤温度主要在 8: 00 ~ 18: 00 时段内累积。SS_RSD 处理在一定程度上升高了土壤温度，并延长了土壤持续高温阶段的时间（图 1）。

2.3 不同处理对土壤酶活性的影响

土壤经 RSD 处理后，除蔗糖酶和过氧化氢酶外，脲酶与酸性磷酸酶活性较处理前均显著增强（表 6）。第一茬土壤处理后，SS_RSD 处理土壤脲酶、酸性磷酸酶活性分别是 CK1 处理的 3.64、2.24 倍，BS 处理土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性分别是 CK1 处理的 1.61、1.15 和 1.29 倍，BC 处理土壤脲酶和酸性磷酸酶活性虽有所上升，但与 CK1 相比差异不显著；第二茬土壤处理后，SS_RSD 处理土壤脲酶、酸性磷酸酶活性分别是 CK1 处理的

4.48、2.00 倍, BS 处理土壤脲酶、酸性磷酸酶活性分别是 CK1 处理的 2.48、1.54 倍。第一茬和第二茬 CK2 处理后, 土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、

磷酸酶活性有所降低, 但与 CK1 处理相比差异不显著; 而 DZ 处理后, 土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均低于 CK1 处理。

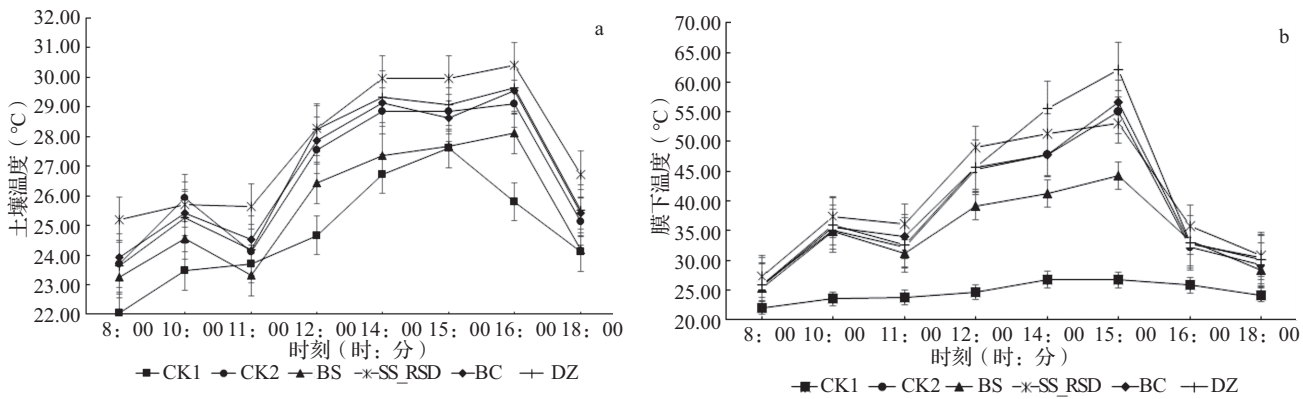


图1 土壤处理过程中 8: 00—18: 00 时段土壤温度 (a) 及膜下温度 (b) 变化

表 6 连续两茬土壤处理对土壤酶活性的影响

处理		脲酶 [mg/ (g · 24 h)]	蔗糖酶 [mg/ (g · 24 h)]	过氧化氢酶 [mg/ (g · 24 h)]	酸性磷酸酶 [mg/ (100 g · 24 h)]
第一茬	CK1	0.28 ± 0.05cd	4.01 ± 0.01c	0.64 ± 0.10a	0.21 ± 0.05bc
	CK2	0.25 ± 0.01cd	3.91 ± 0.01cd	0.55 ± 0.19b	0.17 ± 0.12c
	BS	0.45 ± 0.02b	4.60 ± 0.03a	0.56 ± 0.16b	0.27 ± 0.03b
	SS_RSD	1.02 ± 0.05a	3.83 ± 0.01d	0.37 ± 0.37d	0.47 ± 0.08a
	BC	0.30 ± 0.02c	4.43 ± 0.07b	0.46 ± 0.30c	0.25 ± 0.04b
	DZ	0.21 ± 0.01d	4.02 ± 0.02c	0.50 ± 0.16bc	0.14 ± 0.02c
第二茬	CK1	0.27 ± 0.02cd	5.12 ± 0.10a	0.61 ± 0.05a	0.26 ± 0.03c
	CK2	0.21 ± 0.03d	4.99 ± 0.05ab	0.57 ± 0.04ab	0.36 ± 0.10bc
	BS	0.67 ± 0.02b	4.49 ± 0.04bc	0.50 ± 0.02b	0.40 ± 0.12b
	SS_RSD	1.21 ± 0.01a	3.47 ± 0.01d	0.35 ± 0.01c	0.52 ± 0.04a
	BC	0.31 ± 0.01c	4.78 ± 0.02b	0.53 ± 0.01b	0.35 ± 0.01bc
	DZ	0.22 ± 0.01d	4.21 ± 0.01c	0.49 ± 0.01bc	0.39 ± 0.07b

2.4 土壤理化性质与发病率、防治效果间的相关性分析

土壤理化性质与白菜根肿病发病率、病情指数和防治效果相关性表明 (表 7), pH 值与有机质、防治效果呈显著正相关, 与白菜根肿病发病率、病情指数呈显著负相关 ($P<0.05$); 有机质与全氮呈极显著正相关 ($P<0.01$), 有机质与氧化还原电位、防治效果呈显著正相关, 与根肿病发病率和病情指数呈显著负相关 ($P<0.05$); 氧化还原电位是反映

强还原土壤处理过程中土壤氧化还原状况的重要指标, 土壤氧化还原电位越低说明处理过程中创造的土壤还原性条件越强, 氧化还原电位与发病率、病情指数呈显著正相关, 与防治效果呈显著负相关 ($P<0.05$), 即土壤氧化还原电位越低, 发病率及病情指数越低, 防治效果越好; 有效磷与酸性磷酸酶活性呈显著正相关 ($P<0.05$), 此外, 土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶与根肿病发病率、病情指数、防治效果相关性未达显著水平 ($P>0.05$)。

表 7 土壤理化与发病率、防治效果间的相关性分析

	pH 值	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	氧化还 原电位	脲酶	蔗糖酶	过氧化 氢酶	酸性磷 酸酶	发病率	病情指数	防治效果
pH 值	1													
有机质	0.592 [*]	1												
全氮	0.092	0.818 ^{**}	1											
碱解氮	-0.331	0.296	0.296	1										
有效磷	0.120	0.068	-0.068	0.164	1									
速效钾	-0.086	0.107	-0.107	0.222	0.227	1								
氧化还原电位	0.097	0.664 [*]	0.019	0.114	0.406	-0.061	1							
脲酶	0.196	0.402	0.402	0.191	0.318	0.294	0.132	1						
蔗糖酶	0.448	0.075	0.075	0.265	0.029	0.153	0.041	-0.447	1					
过氧化氢酶	0.382	0.105	0.105	-0.112	0.299	0.067	-0.082	-0.573 [*]	0.397	1				
酸性磷酸酶	0.143	0.065	0.065	0.228	0.594 [*]	0.759	-0.072	0.116	0.388	0.311	1			
发病率	-0.577 [*]	-0.617 [*]	-0.217	0.021	0.358	0.117	0.644 ^{**}	0.214	0.359	-0.095	0.005	1		
病情指数	-0.591 [*]	-0.598 [*]	-0.298	-0.200	0.217	-0.201	0.507 [*]	0.338	0.070	-0.316	-0.155	0.812 ^{**}	1	
防治效果	0.595 [*]	0.515 [*]	0.315	0.241	-0.229	0.215	-0.514 [*]	-0.306	-0.055	0.267	0.178	-0.810 ^{**}	-0.991 ^{**}	1

注：左下三角中的数值分别表示处理后土壤理化性质与白菜根肿病发病率、病情指数及防治效果的相关系数；* 表示在 0.05 水平上相关显著，** 表示在 0.01 水平上相关显著。

3 讨论

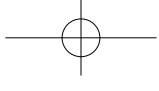
3.1 RSD 能显著降低白菜根肿病发病率并提高白菜产量

作物再次连作后的发病率及产量是衡量土壤灭菌方法能否具有缓解作物连作障碍的重要指征^[18]。Liu 等^[19]研究发现 RSD 处理后显著降低了西瓜枯萎病发病率并提高了西瓜产量。Meng 等^[20]研究发现 RSD 处理后显著提高了植株生物量、座果率和产量。本研究结果与此一致，我们发现 RSD 处理后，白菜根肿病的发病率显著低于对照。第一茬土壤处理后，白菜根肿病发病率降低 21.32% ~ 73.65%，生物产量和经济产量较对照增幅分别达 1.71% ~ 24.25% 和 3.37% ~ 22.47%；第二茬土壤处理后，白菜根肿病发病率降低 35.00% ~ 60.00%，生物产量和经济产量较对照增幅分别达 2.71% ~ 27.96% 和 2.64% ~ 28.77%，两茬处理在降低根肿病发病和提高白菜产量上表现出相同的趋势。

3.2 RSD 能改善土壤理化性质，提高土壤酶活性

通过添加有机物料和厌氧发酵，RSD 可以在短时间内显著改变土壤的理化性质，包括 pH 值、氧化还原电位和养分含量^[21]。连续两茬田间试验结果表明，RSD 处理提升了土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量，降低了土壤电导率和氧化还原电位。RSD 处理后土壤有效磷增加的原因可能有以下两方

面，一方面是豆糠等固体有机物料施入土壤后产生的有机酸可促进有机磷通过矿化作用转成无机磷，另一方面是秸秆降解过程中产生的阴离子与铁、铝结合产生螯合物，闭蓄态的磷转化为有机磷^[22]。樊娅萍等^[23]研究发现，较高的有机质含量可能与较高的 pH 值有关，土壤有机质含量增加与豆糠富含果胶与纤维素密不可分，土壤速效钾含量升高可能与豆糠分解过程中钾的释放有关，本研究结果与其类似。添加沼液显著提高了土壤有机质和全氮含量，但添加沼液后各处理电导率也均有不同程度地升高^[24]，这与李钰飞等^[25]研究结果一致。RSD 处理使土壤氧化还原电位下降至 0 mV 以下，能有效消除土壤积累硝态氮，显著提高土壤 pH 值，降低土壤电导率，与 Meng 等^[20]的研究结果一致。土壤脲酶和碱性磷酸酶可作为评价土壤肥力的指标，有机质是影响脲酶活性最主要的因素，土壤全氮和有效磷是影响磷酸酶活性的关键因素^[26]。本研究连续两茬田间试验结果表明，RSD 处理后，土壤脲酶、磷酸酶活性增加，而过氧化氢酶、蔗糖酶活性有所降低，处理过程中豆糠等有机物料生物降解和土壤温度的升高可能是导致脲酶活性变化的主要原因，而土壤磷酸酶活性的变化与土壤有效磷含量的变化密切相关。土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性与土壤微生物量和土壤呼吸密切相关，RSD 处理过程中产生的有机酸和创造的强烈厌氧环境抑制了土壤的微生物活性可能是土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性降低的主



要原因。RSD 处理后, 有机质和有效磷含量均显著增加, 同时土壤脲酶和磷酸酶活性也显著提高, 在以其他有机物料进行 RSD 处理的报道中也有类似的结论^[19, 27-28]。此外, 在 RSD 处理下, 土壤酶活性的改变也可能抑制了根肿菌的生存和致病力, 厌氧细菌通过释放不同性质的抗真菌酶来消除真菌病原体可能是导致白菜根肿病发病率下降的原因之一^[27-28]。

3.3 RSD 的抑菌机理及应用前景

已有的研究报道表明, RSD 的杀菌机理可能有: 厌氧环境、有机酸、铁锰离子等抑菌物质以及土壤微生物群落结构重建^[29-34]。芸薹根肿菌是好氧型真菌, 土壤强还原过程中营造强烈的厌氧环境是导致其死亡、数量下降的原因之一^[35]。强还原处理选用的有机物料碳氮比也是影响处理效果的一个关键因素^[29], 碳氮比过高会造成土壤氮素损失, 易分解的低碳氮比有机物料在强还原处理过程中不仅可以增加土壤溶解性有机碳含量, 还驱动了与反硝化作用相关微生物富集, 减少硝态氮随灌溉水向深层土壤淋溶^[36]。此外, 有机物料类型也是影响 RSD 处理效果的关键因素之一, 本研究中, 创新地选用当地易于收集的豆糠和猪粪源沼液作为供试有机物料, 结果发现豆糠强还原处理效果较沼液效果更好, 这一结果与王宝英^[35]、刘亮亮等^[37]的研究结果一致, 即固体有机物料与耕作层土壤混匀后不会随着灌溉水而移动, 只在耕作层土壤经微生物分解并产生杀菌作用, 而液体有机物料与灌溉水混合后会随着土壤下渗, 在更深的土层产生作用的同时也减弱了其在耕作层的杀菌作用。有机物料施用量也是影响强还原效果的重要因素之一, 其施用量应视病害严重程度而定, 发病率及病害严重程度较高的田块可适当加大有机物料的施用量^[38]。温度和时间也是控制土传病害的重要因素^[19]。RSD 处理在夏季温度较高时处理效果较好, 处理时间一般 2 ~ 4 周, 而在冬季低温茬口期可以通过适当延长处理时间来确保防治效果^[37]。在 RSD 处理过程中, 单独淹水对尖孢镰刀菌有抑制作用, 但在播种期不能有效地控制尖孢镰刀菌^[21], 本研究也呈现出类似的结果, 即单独淹水并覆膜处理对白菜根肿病防治效果不佳。RSD 处理和生物炭修复被认为是改善退化蔬菜土壤的可持续管理措施^[39]。然而本研究发现单独生物炭处理对白菜根肿病防治效果不佳, 这可能是由于生物炭具有多孔结构, 在处理过程中不能形成强烈的还原条件^[40]。因此, 在 RSD

处理中, 生物炭与堆肥、沼液等有机物料相结合可能是一种更可持续、环境友好、消减白菜连作土壤障碍因子及减排处理过程中产生的温室气体效益更高的方法^[41-42]。RSD 处理在解决农业残留物积累、设施土壤修复、土传病害防治以及连作障碍克服等方面具有巨大的潜力和效益^[21]。本研究所用有机物料对白菜根肿病虽具有一定的防治效果, 但其防治效果能否随施用量的增加而增加, 一次 RSD 处理能保障白菜等十字花科作物连续种植多少茬, 有机物料处理过程中有机酸种类及含量变化和对白菜根肿病的抑菌机理还有待进一步深入研究, 以获得真正适用于农业实际生产推广的防治技术。

4 结论

本研究通过对比不同土壤灭菌方式对白菜根肿病的防治效果, 发现连续两茬豆糠强还原土壤处理 (SS_RSD) 对白菜根肿病防治效果优于其他处理, 达 76.89% ~ 79.31%, 使白菜根肿病发病率降低 60.00% ~ 66.99%, 产量增加 24.25% ~ 27.96%。

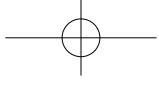
本研究通过比较不同土壤灭菌方式对白菜连作土壤障碍因子的消减效应, 发现豆糠强还原土壤处理 (SS_RSD) 有效提高了土壤有机质、全氮、有效磷含量, 提高了土壤脲酶、磷酸酶活性, 从而改善了设施白菜连作土壤质量。

本研究通过对比不同土壤处理方式对白菜连作障碍的消减效应, 发现强还原土壤处理是一种能快速消除白菜连作土壤障碍因子并提高设施土壤资源利用率的方法, 可作为土壤化学熏蒸的替代方法且对根肿病能保证相对较高的防治效果。

参考文献:

- [1] Pengjie H, Wenyan C, Shahzad M, et al. Plasmodiophora brassicae root hair interaction and control by *Bacillus subtilis* XF-1 in Chinese cabbage [J]. *Biological Control*, 2019, 128: 56-63.
- [2] Chunming L, Zhenfu Y, Pengfei H, et al. Deciphering the bacterial and fungal communities in clubroot-affected cabbage rhizosphere treated with *Bacillus subtilis* XF-1 [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 12-22.
- [3] Lebreton L, Guillerm-Erckelboudt A Y, Gazengel K, et al. Temporal dynamics of bacterial and fungal communities during the infection of *Brassica rapa* roots by the protist *Plasmodiophora brassicae* [J]. *Plos One*, 2019, 14 (2): e0204195.
- [4] Junhui L, Joshua P, Jishun L, et al. *Trichoderma harzianum*

- inoculation reduces the incidence of clubroot disease in Chinese cabbage by regulating the rhizosphere microbial community [J]. *Microorganisms*, 2020, 8 (9): 1325.
- [5] Panth M, Hassler S C, Baysal-Gurel F. Methods for management of soilborne diseases in crop production [J]. *Agriculture*, 2020, 10 (1): 16.
- [6] Chunming L, Zhenfu Y, Pengfei H, et al. Fluazinam positively affected the microbial communities in clubroot cabbage rhizosphere [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108519.
- [7] 胡洪涛, 朱志刚, 焦忠久, 等. 棉隆土壤消毒对高山甘蓝根肿病的防效及土壤真菌群落的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38 (3): 25-31.
- [8] 胡洪涛, 朱志刚, 焦忠久, 等. 棉隆土壤消毒对高山甘蓝根肿病土壤细菌群落结构的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36 (16): 120-127.
- [9] Hwang S F, Ahmed H U, Strelkov S E, et al. Suppression of clubroot by dazomet fumigant [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, 98: 172-182.
- [10] Zhao J, Zhou X, Jiang A, et al. Distinct impacts of reductive soil disinfestation and chemical soil disinfestation on soil fungal communities and memberships [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2018, 102 (17): 7623-7634.
- [11] Zhao J, Liu S, Zhou X, et al. Reductive soil disinfestation incorporated with organic residue combination significantly improves soil microbial activity and functional diversity than sole residue incorporation [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2020, 104 (17): 7573-7588.
- [12] Testen A L, Miller S A. Anaerobic soil disinfestation to manage soilborne diseases in muck soil vegetable production systems [J]. *Plant Disease*, 2019, 103 (7): 1757-1762.
- [13] Meng T, Ren G, Wang G, et al. Impacts on soil microbial characteristics and their restorability with different soil disinfestation approaches in intensively cropped greenhouse soils [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2019, 103 (15): 6369-6383.
- [14] Liu L, Chen S, Zhao J, et al. Watermelon planting is capable to restructure the soil microbiome that regulated by reductive soil disinfestation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 52-60.
- [15] 南京农学院. 土壤农化分析 [M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [17] Siemens J, Nagel M, Ludwigmüller J, et al. The interaction of *Plasmodiophora brassicae* and *Arabidopsis thaliana*: parameters for disease quantification and screening of mutant lines [J]. *Journal of Phytopathology*, 2010, 150 (11): 592-605.
- [18] 王宝英, 李金泽, 黄新琦, 等. 土壤强还原处理对连作芥蓝产量、微生物数量及活性的影响 [J]. *土壤*, 2019, 51 (2): 316-323.
- [19] Liu L L, Yan Y Y, Ahmad A, et al. Deciphering the *Fusarium-wilt* control effect and succession driver of microbial communities managed under low-temperature conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 171: 104334.
- [20] Meng T Z, Ren G D, Wang G F, et al. Impacts on soil microbial characteristics and their restorability with different soil disinfestation approaches in intensively cropped greenhouse soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103 (15): 6369-6383.
- [21] Weijing Z, Weiping W, Chunlai H, et al. Influence of reductive soil disinfestation on the chemical and microbial characteristics of a greenhouse soil infested with *Fusarium oxysporum* [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2022, 118: 101805.
- [22] 陈士勇, 杨艳, 帅黄, 等. 强还原处理对西瓜连作土壤性质及西瓜产量的影响 [J]. *扬州大学学报 (农业与生命科学版)*, 2019, 40 (5): 103-109.
- [23] 樊妮萍, 陈芳玲, 贺苗苗, 等. 强还原灭菌条件下添加橘皮对土壤性状与酶活性的影响 [J]. *华北农学报*, 2021, 36 (S1): 253-259.
- [24] 郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (5): 1111-1121.
- [25] 李钰飞, 许俊香, 刘本生, 等. 不同来源沼液对土壤微生物群落碳代谢的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2021, 29 (11): 1921-1930.
- [26] 刘艳, 侯龙鱼, 崔晓东, 等. 黄河三角洲冲积平原湿地土壤脲酶活性与养分通径分析 [J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26 (3): 327-329.
- [27] Atsuko U, Toshiaki T, Gen I, et al. Production of β -1, 3-glucanase and chitosanase from clostridial strains isolated from the soil subjected to biological disinfestation [J]. *AMB Express*, 2019, 9 (1): 114.
- [28] Atsuko U, Toshiaki T, Gen I, et al. β -1, 3-Glucanase production as an anti-fungal enzyme by phylogenetically different strains of the genus *Clostridium* isolated from anoxic soil that underwent biological disinfestation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104 (12): 5563-5578.
- [29] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究 [J]. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 469-476.
- [30] 王光飞, 艳马, 霞安, 等. 不同有机物料强还原处理对土壤性状影响与防控辣椒疫病效果 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016 (5): 124-129.
- [31] 古力, 李烜桢, 李明杰, 等. 强还原和淹水处理对地黄连作障碍的消减效应 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2021, 29 (8): 1305-1314.
- [32] 朱文娟, 王小国. 强还原土壤灭菌研究进展 [J]. *土壤*, 2020, 52 (2): 223-233.
- [33] 吉春阳, 何云华, 孙小飞, 等. 强还原与生物炭对土壤酶活性和温室气体排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41 (2): 974-982.



- [34] 李云龙, 王宝英, 常亚锋, 等. 土壤强还原处理对三七连作障碍因子及再植三七生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 703–715.
- [35] 王宝英. 土壤强还原处理对连作芥蓝产量、微生物数量及活性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(2): 316–323.
- [36] Tan X, Liao H, Shu L, et al. Effect of different substrates on soil microbial community structure and the mechanisms of reductive soil disinfestation[J]. Front Microbiol, 2019, 10: 2851.
- [37] 刘亮亮, 周开胜, 黄新琦, 等. 低温茬口空闲期土壤强还原消毒对西瓜枯萎病的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2967–2974.
- [38] Everaldo Antônio L, Ellen Júnia C, Vanessa Alves G, et al. Anaerobic soil disinfestation for the management of soilborne pathogens: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 174: 104408.
- [39] Chunyang J, Rongzhong Y, Yunfeng Y, et al. Reductive soil disinfestation with biochar amendment modified microbial community composition in soils under plastic greenhouse vegetable production[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105323.
- [40] 吉春阳, 何云华, 马亚培, 等. 强还原处理和生物炭对设施蔬菜土壤 DOM 数量和光谱特征的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 1066–1073.
- [41] Min X, Yang X, Jun W, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice–rape rotation ecosystem over 3 years[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2534–2542.
- [42] Aown A, Muhammad N, Muhammad A, et al. Efficiency of wheat straw biochar in combination with compost and biogas slurry for enhancing nutritional status and productivity of soil and plant[J]. Plants, 2020, 9(11): 1516.

Study on the control effect of reductive soil disinfestation on clubroot disease of continuous cropping Chinese cabbage

ZHANG Zhi-hao¹, XIE Guo-ling¹, WU Liu-tong¹, XU Quan-jie¹, ZHANG Yong-hui², ZHANG Ji-lai¹, LIN Chun³, DENG Yi-shu⁴, ZHANG Nai-ming^{1, 5}, SU You-bo^{1*} (1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 2. Kangle County Agricultural and Rural Bureau, Linxia Prefecture, Gansu Province, Linxia Gansu 731500; 3. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 4. College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 5. Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming Yunnan 650201)

Abstract: The purpose of this study was to explore the reduction effect of reductive soil disinfestation (RSD) on soil barrier factors in continuous cropping of Chinese cabbage, and provide a theoretical basis for enriching green, effective and environmentally friendly control strategies of cruciferous crops. Six treatments were set up, including blank soil without any treatment (CK1), soil only flooded and covered by film (CK2), adding biogas slurry RSD treatment (adding biogas slurry to the soil to the maximum field capacity and film, BS), adding soybean bran RSD treatment (adding 20 t/hm² soybean bran evenly to the soil after irrigation to the maximum field capacity and film, SS_RSD), biochar repair (5 t/hm² biochar was evenly added to the soil and then irrigated to the maximum field water holding capacity and coated film, BC), cotton dragon fumigation (adding 0.5 t/hm² cotton dragon evenly to the soil, irrigation to 60% ~ 70% of the maximum field capacity and film, DZ), and the changes of incidence, yield, soil physical and chemical properties and enzyme activities of cabbage clubroot under different treatments were compared. The results of two consecutive trials showed that, compared with CK1 treatment, the yields of CK2 and DZ treatments increased by 1.71% ~ 2.71% and 18.74% ~ 25.51%, respectively, and the incidence rates decreased by 15.32% ~ 18.33% and 53.33% ~ 73.65%, respectively. The incidence of BS and BC treatment decreased by 21.32% ~ 45.00% and 35.00% ~ 35.99%, respectively, and the yield increased by 13.19% ~ 15.07% and 14.26% ~ 19.90%, respectively, compared with CK1. The control effect of SS_RSD on cabbage clubroot reached 76.89% ~ 79.31%, which reduced the incidence of cabbage clubroot by 60.00% ~ 66.99%, and increased the yield by 24.25% ~ 27.96%. Moreover, SS_RSD increased the contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and soil urease and phosphatase activities. Therefore, RSD is an effective measure to rapidly reduce the continuous cropping obstacles of Chinese cabbage and realize the healthy and efficient utilization of soil resources in facilities.

Key words: reductive soil disinfestation; cabbage clubroot disease; yield; soil physics and chemistry properties; enzyme activity