

# 云南大白菜主产区根肿病发生流行规律及防治策略

张智浩, 解国玲, 徐权杰, 刘佳伟, 吴流通, 苏友波

(云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201)

**摘要:** 为了明确云南省大白菜主产区主要病害的发生情况, 进而为大白菜病害综合防控提供科学依据, 2020年采用调查问卷、实地调查、文献查阅等方法, 对祥云县、嵩明县、晋宁区、通海县、陆良县等云南大白菜主产区主要病害现状及发病规律进行了调查。结果表明, 云南大白菜主产区对大白菜品质和产量影响最大的病害是根肿病。与露天栽培相比, 设施栽培条件下根肿病发生范围更广、发病率更高、发病程度更重, 根肿病发病率和病情指数由高到低依次为祥云县>嵩明县>晋宁区>通海县>陆良县。云南省大白菜根肿病发生地域主要集中在昆明市、玉溪市、大理州、楚雄州, 危害程度局部偏重。未来, 从根际微生态角度研究根肿病生态防控手段, 开展抗病品种的发掘与利用和基于多技术组合的十字花科作物健康栽培实践探索, 将有利于解析根肿病发病机制, 为根肿病基础研究与防控提供理论和技术支持。

**关键词:** 大白菜; 云南省; 根肿病; 发生规律; 防治策略

中图分类号: S634.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2022)10-076-07

## Epidemic regularity and control strategy of clubroot disease in main producing areas of Chinese cabbage in Yunnan province

ZHANG Zhihao, XIE Guoling, XU Quanjie, LIU Jiawei, WU Liutong, SU Youbo

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to clarify the occurrence types and situation of main diseases in the main producing areas of Chinese cabbage in Yunnan Province, and provide scientific basis for the comprehensive prevention and control of Chinese cabbage diseases. In 2020, the current situation and incidence of main diseases in the main producing areas of Chinese cabbage in Yunnan, such as Xiangyun County, Songming County, Jinning District, Tonghai County and Luliang County, were investigated by means of questionnaire, field investigation and literature review. The results showed that the most important disease affecting the quality and yield of Chinese cabbage in Yunnan was clubroot. Compared with open-air cultivation, the occurrence range of clubroot under protected cultivation conditions was wider, the incidence rate was higher, and the incidence degree was heavier. The incidence and disease index of clubroot from high to low were Xiangyun County> Songming County>Jinning District>Tonghai County>Luliang County. The occurrence areas of Chinese cabbage clubroot in Yunnan Province are mainly concentrated in Kunming City, Yuxi City, Dali Prefecture and Chuxiong Prefecture, and the degree of harm is partial. In the future, it will be beneficial to analyze the pathogenesis of clubroot and provide theoretical and technical support for the basic research and prevention and control application of clubroot by studying the ecological prevention and control methods of clubroot from the perspective of rhizosphere microecology, exploring and utilizing disease-resistant varieties and exploring the healthy cultivation practice of cruciferous crops based on multi-technology combination.

**Key words:** Chinese cabbage; Yunnan province; Clubroot disease; Occurrence regularity; Control strategy

大白菜(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)属十字花科, 是一种重要的叶菜类蔬菜, 不仅具有较高的商业价值, 对人体健康也有积极的促进作用<sup>[1]</sup>。截

止到 2019 年末, 云南省蔬菜栽培面积已达 116.50 万  $\text{hm}^2$ , 蔬菜产量 2 304.14 万 t, 叶菜类和白菜类产量分别为 292.38 万 t 和 528.66 万 t<sup>[2]</sup>。大白

收稿日期: 2022-04-14; 修回日期: 2022-07-05

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, 男, 在读硕士研究生, 主要从事耕地土壤质量提升研究。E-mail: 1481799152@qq.com

通信作者: 苏友波, 男, 副教授, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: youbosu@ynau.edu.cn

菜在云南省高原特色蔬菜产业中占有重要地位,因其营养丰富,风味清新且种类繁多,深受人们的喜爱,已成为主食蔬菜之一。在我国人口数量不断增长和耕地面积不断减少的双重压力下,我国的作物连作需求较其他国家更为迫切,连作已成为我国集约化种植模式中较为普遍的一种种植方式。然而长期单一连作,会导致土壤中各种病原微生物大量累积,土传病害发生严重,严重影响作物或蔬菜的产量和品质。目前,我国已成为世界上作物土传病害发生率最高和发生情况最严重的国家<sup>[3]</sup>。作物土传病害每年对我国近 0.03 亿  $\text{hm}^2$  经济作物生产造成的损失达数百亿元<sup>[4]</sup>。土传病害已成为农业可持续发展的主要瓶颈,在生产中造成作物抗性降低、产量下降和生产成本上升等重大问题<sup>[5]</sup>。促进蔬菜产业的可持续发展已成为重要的共识。但保护蔬菜业,必须先调查限制蔬菜产业可持续发展的主要土传病害及其发病规律,研究结果不仅能促进蔬菜产业可持续发展,而且对农村商品经济发展和实现乡村振兴具有重大现实意义。土传病害被认为是作物生产的主要限制因素,芸薹根肿菌(*Plasmiodiophora brassicae*)、欧文氏菌(*Erwinia aroideae*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)等土传病原菌可导致白菜、水果等多种重要经济作物减产 50%~75%<sup>[6-7]</sup>。虽然大白菜病害调查工作早已陆续开展,但有关云南大白菜病害发生,特别是关于大白菜主要土传病害的发病规律和危害调查的报道较少,且随着经济的发展,云南省蔬菜种植结构和大白菜种植规模发生了巨大变化<sup>[8-9]</sup>。因此,对云南省大白菜主产区开展主要病害的发病规律调查十分迫切<sup>[10]</sup>。目前,土传病害已严重影响了云南省大白菜产量和品质,挫伤菜农的生产积极性,成为生产上亟待解决的问题。云南省大白菜主要病害发生率及危害程度随种植技术及种植规模的变化而改变,为促进云南大白菜这一重要蔬菜资源的利用与保护,有必要进行系统的大白菜主要病害调查。了解云南大白菜主产区主要病害发病规律及危害,为指导农业生产、帮助农户预防和有效控制土传病害蔓延提供理论依据,同时也为制定云南省蔬菜产业可持续发展战略和打造云南绿色食品品牌提供数据基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查内容

2020年10—12月,选择玉溪市通海县、昆明市

晋宁区、昆明市嵩明县、大理州祥云县、曲靖市陆良县5个云南叶菜主产区作为调查区,5个地区皆为云南省滇中地区叶菜主产区,蔬菜栽培历史悠久,规模较大,具有代表性。主要调查大白菜、上海青、生菜、油麦菜等叶菜类蔬菜的主要土传病害发生现状及发病规律。调查对象为晋宁区、嵩明县、通海县、祥云县、陆良县等主要叶菜产区的蔬菜种植户。

### 1.2 调查方法

1.2.1 调查问卷 向种植户发放调查问卷,调查问卷内容主要包括:主栽蔬菜种类和品种、种植时间、种植面积、产量、产值、年种植茬数,化肥、有机肥和生物有机肥施用情况,主要土传病害等。

1.2.2 访谈调查 走访蔬菜种植户和县乡农技部门获取更丰富和详实的信息,2020年发放纸质调查问卷150份,收回有效问卷128份。

1.2.3 资料调查 以CNKI《中国学术期刊网络出版总库》为检索源,在数据库期刊专业检索口以根肿病为主题词进行检索,时间跨度为2001年1月1日至2020年12月31日,检索时间为2021年2月7日,共检索到相关文献490篇,剔除重复、与主题不符、非学术性文章(含会议通知、新闻报道、政策文件等)后,最终得到来自中国知网数据库的279篇有效文献作为分析研究的对象。对通海县、晋宁区、嵩明县、祥云县、陆良县的主要土传病害发生现状及发病规律进行分析。并与当地懂技术的叶菜种植者、技术人员,以交流会商的形式进行研讨、调查。

1.2.4 发病率调查及病害分级 采用随机调查、大白菜种植基地随访和定点调查等方法调查云南省危害大白菜主要病害的种类及发生规律,对症状进行观察、拍照,记录病害发生情况;对危害较严重、经济影响较大的土传病害进行重点调查。选择有代表性的蔬菜种植基地进行调查,每个蔬菜基地随机选取5个田块进行调查,每田块调查50株,按下列公式计算发病率。大白菜根肿病病情分级按Siemens等<sup>[11]</sup>的5级分级标准:0级,大白菜根系没有发生肿瘤;1级,大白菜侧根发生肿瘤,数量占根系全部的1%~25%;2级,主根上出现肿瘤,侧根上数量占根系全部的26%~49%;3级,主根上有肿瘤,数量占根系全部的50%~75%;4级,主根上有肿瘤,数量占根系全部的75%以上。病害发生程度分级按桑利伟等<sup>[12]</sup>的分级方法进行:发病率<5%为零星发生;发病率5%~10%为轻度发生;发病率11%~30%为中度发生;发病率31%~50%为重度发生;发

病率>50%为大流行。发病率、病情指数分别按以下公式计算:

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

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

### 1.3 数据统计分析

使用 Excel2016 软件计算发病率及病情指数,使用 SPSS 26.0 软件进行差异显著性检验。

## 2 调查结果与分析

### 2.1 产业基本情况

调查的玉溪市通海县、昆明市晋宁区、昆明市嵩明县、大理州祥云县、曲靖市陆良县年均温 14.00~16.20 °C,无霜期 232~281 d,年均降雨量 810.80~

1 000.00 mm,年日照时数 2 200.00~2 442.50 h,适宜叶菜类蔬菜种植。据统计,2020 年通海县蔬菜种植面积 2.35 万 hm<sup>2</sup>,总产量 146.13 万 t,平均单产 6.22 万 kg·hm<sup>-2</sup>,总产值 17.93 亿元,平均产值 7.63 万元·hm<sup>-2</sup>;晋宁区蔬菜种植面积 1.78 万 hm<sup>2</sup>,总产量 51.56 万 t,平均单产 2.90 万 kg·hm<sup>-2</sup>,总产值 16.70 亿元,平均产值 9.38 万元·hm<sup>-2</sup>;嵩明县蔬菜种植面积 2.05 万 hm<sup>2</sup>,总产量 64.50 万 t,平均单产 3.15 万 kg·hm<sup>-2</sup>,总产值 9.61 亿元,平均产值 4.69 万元·hm<sup>-2</sup>;祥云县蔬菜种植面积 1.07 万 hm<sup>2</sup>,总产量 29.50 万 t,平均单产 2.76 万 kg·hm<sup>-2</sup>,总产值 8.35 亿元,平均产值 7.80 万元·hm<sup>-2</sup>;陆良县蔬菜种植面积 3.96 万 hm<sup>2</sup>,总产量 113.99 万 t,平均单产 2.88 万 kg·hm<sup>-2</sup>,总产值 14.25 亿元,平均产值 3.60 万元·hm<sup>-2</sup>(表 1)。

表 1 调查区域气候资源概况及 2020 年蔬菜产业基本情况

地区	调查区域气候资源概况					调查区域蔬菜产业基本情况				
	海拔分布/m	年均温/°C	无霜期/d	年降雨量/mm	年日照时数/h	种植面积/万 hm <sup>2</sup>	总产量/万 t	平均单产/(万 kg·hm <sup>-2</sup> )	总产值/亿元	平均产值/(万元·hm <sup>-2</sup> )
通海县	1350~2443	16.20	272.00	903.70	2 234.90	2.35	146.13	6.22	17.93	7.63
晋宁区	1340~2648	15.10	240.00	1000.00	2 200.00	1.78	51.56	2.90	16.70	9.38
嵩明县	1770~2840	14.00	232.00	1000.00	2 346.60	2.05	64.50	3.15	9.61	4.69
祥云县	1433~3241	14.70	281.00	810.80	2 331.55	1.07	29.50	2.76	8.35	7.80
陆良县	1640~2687	14.70	249.00	950.00	2 442.50	3.96	113.99	2.88	14.25	3.60

注:数据来源为通海县人民政府、昆明市晋宁区人民政府、昆明市嵩明县人民政府、祥云县人民政府、陆良县人民政府、《2020 云南统计年鉴》《通海县农业农村局部门 2020 年度部门决算》《昆明市晋宁区 2020 人民政府工作报告》《嵩明县 2020 人民政府工作报告》《祥云县 2020 年国民经济和社会发展统计公报》《陆良县 2020 人民政府工作报告》。

### 2.2 大白菜主产区根肿病发生原因

调查发现,云南省十字花科蔬菜根肿病的扩散主要通过田间残留,病土育苗,旋耕、灌溉等农事操作和农事器具传播。云南省大白菜主产区根肿病流行的主要原因是:(1)茬口密集、土地无休耕。长期种植单一品种,土地复种指数高、连作障碍严重,农药化肥等化学物质短时间内大量投入有限的空间,导致土壤养分失衡,土壤有害微生物大量积累。(2)菜苗调运、农机等工具携带病原菌导致根肿病在棚间快速转移、蔓延。(3)不当农事操作,造成土传病害危害严重。大白菜收获后,菜农们将地上部收走,将地下部肿根深翻旋耕打碎在土壤里,肿根在土壤中腐烂,释放出更多的孢子,休眠孢子土壤中越冬,等到第二年春季环境适宜时,休眠孢子开始萌发,逐渐扩散到相邻的田块,只要再植十字花科作物,根肿病将连年发病且愈发严重。(4)土传病害发生趋于复杂化。土传病害通常与地上病

虫害、土壤酸化、土壤盐渍化、土壤养分失衡等混合发生,复杂化的演变趋势加大了土传病害的防控难度。

### 2.3 大白菜主产区根肿病发病规律

调查发现,大白菜苗期易受根肿菌侵染且不易发现,幼苗移栽 14 d 后开始出现肿根,1~2 个月后根肿病暴发达到高峰期。调查还发现,根肿病在全省十字花科作物种植区域均有发生,发病主要集中在 5—8 月和 10—12 月。设施栽培高温高湿的环境条件下,根肿菌快速传播蔓延,导致根肿病发病率高于露天栽培,其中多年重茬大棚根肿病发生较严重,且发病区域主要在大棚入口及边缘两侧,新建成的蔬菜基地则少有根肿病发生。

### 2.4 大白菜主产区根肿病防治措施

调查发现,目前大白菜主产区主要通过育苗移栽、与菊科(Compositae)等非十字花科作物倒茬轮作和大量施用硅钙肥(6.39 t·hm<sup>-2</sup>),硅钙总含量(w,

后同)≥83%,CaO含量≥47%,SiO<sub>2</sub>含量≥36%,提高土壤pH值(pH 9~10)等措施来防治根肿病。育苗移栽相较种子直播缩短了根肿菌对寄主植物的侵染期;与非十字花科作物倒茬轮作短期内可延缓根肿菌侵染,但长期轮作不利于蔬菜产业发展,且根肿菌与非寄主植物间的互作关系还有待进一步探究。大量施用硅钙肥导致土壤pH值升高,虽一定程度抑制了休眠孢子萌发,但生产中发现只要再次种植十字花科作物仍然会发生根肿病危害。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造成的连作障碍问题。生防菌剂易受田间复杂环境气候影响导致效果不稳定且价格昂贵,如果应用不当,可能导致生产成本增加。人们对长期使用化学品后的环境污染和食品安全问题日益担忧,石灰重复施用会破坏土壤结构,轮作、混作模式下土壤中根肿菌休眠孢子难以根除等仍是实际生产中是难以解决的问题(表2)。

表2 白菜根肿病防治措施及存在的问题

防控措施	具体措施	存在问题
化学防控	溴甲烷和三氯硝基甲烷等化学杀菌剂	易造成土壤微生物真空状态,容易引发病原菌反弹,加重病害;对人类健康、环境和臭氧层有极大的破坏作用 <sup>[13]</sup> 。
物理防控	以日光曝晒、高温闷棚和水蒸汽消毒为主	需要严苛的温度和热力条件,需投入较多的劳动力和较高的技术成本,目前只在有限的高产值农作物上使用 <sup>[14]</sup> 。
生物防控	生防菌	面临适应土壤及周围的环境以及土著微生物排斥等一系列对其定殖造成干扰的问题,田间效慢、效果不稳定 <sup>[15]</sup> 。
农艺防控	增施动植物有机肥、田间淹水或轮作、间/套作、栽植抗病品种等	大部分手段来自传统农业中的防治经验,使得杀菌效果不稳定且病原菌复发性强,抗病品种在土传病害防治上仍未发挥应有的作用,且存在土壤中病原菌不断积累的风险 <sup>[16]</sup> 。

因此,为保证农业的绿色可持续发展,迫切需要一种具有广谱抑病特性和对环境、生物友好的绿色防控技术方法来防控根肿病。

### 2.5 大白菜主产区主要病害区域分布

祥云县大白菜主产区根肿病病田率为5%~37%,局地偏重;通海县近年根肿病发病田率

4%~17%,发生程度中等,且发生高峰从每年6—7月扩大为局部地区全年均出现普遍发生;晋宁区根肿病病田率3%~24%,发生程度中等;嵩明县根肿病病田率5%~36%,发生程度中等;陆良县根肿病发病田率3%~20%,程度较轻。此外,霜霉病、病毒病、白粉病、灰霉病在云南省大白菜主产区局地发

表3 2020年大白菜主产区主要病害情况

调查区	主要病害	病田率/%	病株率/%	发病严重程度	发生区域
晋宁县	根肿病	3~24	5~32	中等偏轻	全县十字花科蔬菜种植区
	霜霉病	5~28	8~30	中等偏轻	全县蔬菜种植区
	黑腐病	3~20	4~48	中等偏重	全县西兰花、莴笋、甘蓝等蔬菜种植区
	病毒病	5~30	6~38	中等偏轻	全县番茄、西葫芦种植区
	白粉病	5~24	5~40	中等偏重	全县豌豆种植区
嵩明县	根肿病	5~36	10~48	中等偏轻	全县十字花科蔬菜种植区
	霜霉病	10~72	10~50	中等偏重	全县蔬菜种植区
	病毒病	2~18	3~48	中等偏重	全县莴笋、甘蓝等蔬菜种植区
	灰霉病	4~28	8~24	中等偏重	全县菜豌豆种植区
通海县	根肿病	4~17	5~27	中等,局地偏重	全县十字花科蔬菜种植区
	软腐病	5~67	30~78	中等,局地偏重	全县白菜等蔬菜作物种植区
	灰霉病	3~36	4~52	中等	全县菜豆、瓜类和茄果类蔬菜种植区
祥云县	根肿病	5~37	10~70	中等偏重	全县十字花科蔬菜种植区
	霜霉病	4~25	5~48	中等偏重	全县蔬菜种植区
	白粉病	2~20	10~40	中等	全县蔬菜种植区
	病毒病	3~17	6~30	中等	全县蔬菜种植区
陆良县	根肿病	3~20	5~20	中等偏轻	全县十字花科蔬菜种植区
	霜霉病	5~28	10~48	中等	全县蔬菜种植区
	白粉病	4~24	6~40	中等	全县蔬菜种植区

生,发生程度因各地气候条件和栽培管理措施不同而存在差异(表3)。

调查发现,祥云县局部蔬菜基地十字花科作物根肿病发病率达82.00%,病情指数为50.53;嵩明县大白菜主产区根肿病发病率为54.00%,病情指数为26.27;通海县大白菜主产区根肿病发病率为39.60%,病情指数为13.87;陆良县大白菜主产区根肿病发病率为10.40%,病情指数为10.40。祥云县大白菜主产区根肿病发病率和病情指数显著高于晋宁县、嵩明县、通海县和陆良县。按根肿病发病率和病情指数从高到低排序依次为祥云县>嵩明县>晋宁区>通海县>陆良县(表4)。

表4 大白菜根肿病田间发生调查

地区	寄主	发病率/%	病情指数
晋宁区	大白菜、小白菜	43.20 ± 5.43 bc	17.73 ± 2.14 c
嵩明县	大白菜	54.00 ± 3.29 b	26.27 ± 2.21 b
通海县	大白菜、小白菜、黄白菜	39.60 ± 4.83 c	13.87 ± 1.45 c
祥云县	黄白菜、包心苦菜	82.00 ± 4.00 a	50.53 ± 2.64 a
陆良县	大白菜	10.40 ± 3.31 d	10.40 ± 3.31 c

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

### 3 讨论

近年来云南省大白菜主要病害发生了新变化,根肿病上升为大白菜的主要土传病害,其危害程度远远大于软腐病等其他病害,年均造成十字花科作物减产25%~60%<sup>[17]</sup>。在对云南省大白菜主产区的调查时还发现,软腐病、霜霉病、灰霉病在大白菜产区局地发生,发生程度中等,可能是调查期间正值气候较干旱、少雨时期,不利于这些病害的发生和流行。根肿病发生受品种、土壤理化性质、栽培方式等多方面影响,不同大白菜品种对根肿病存在抗性差异。根肿病休眠孢子在苗期就开始侵染植株,减少初期侵染源能有效减轻根肿病的危害程度。从生长季节看,由于气温影响,大白菜根肿病呈现冬春病轻、夏秋病重的特点,通过育苗移栽的方式,大白菜根肿病的发病率和病情指数均低于种子直播。从空间分布上看,设施大棚边缘两侧和出入口处大白菜根肿病发病率及严重程度均高于棚内其他区域,这与Hlavjenka等<sup>[18]</sup>研究结果一致。

芸薹根肿菌是专性寄生菌,扩散性强、传播途径多样、危害大、防治困难,其休眠孢子可在土壤中生存长达15~20年,当遇到宿主植物后,休眠孢子会继续萌发,在土壤中进行传播<sup>[19]</sup>。COOK等<sup>[17]</sup>将其生命周期分为休眠孢子、根毛侵染和皮质侵染3个阶段。长期单一连作、不当的农事操作均会促进

大白菜根肿病的蔓延,加重根肿病的严重程度。通过施用富含石灰的土壤改良剂提高土壤pH值来减少根肿菌侵染<sup>[14]</sup>,抗病品种选育<sup>[16]</sup>、轮作<sup>[20]</sup>、施用氟啶胺等化学杀菌剂<sup>[13]</sup>和枯草芽孢杆菌、哈茨木霉等生防菌剂<sup>[15]</sup>,以及感病品种与抗病品种混作<sup>[21]</sup>等是目前防治大白菜根肿病的主要措施。物理防治和化学防治可以通过减少或延迟根肿菌对白菜根系的侵染,在一定程度上缓解大白菜根肿病的发生及严重程度,但存在施用成本高、易引发病原菌反弹等问题。目前生物熏蒸只在少数高产值农作物上使用,在推广使用范围上受限。抗病品种和生防菌虽然对抑制根肿菌侵染表现出较好的试验效果,但在田间会出现防效不稳、病原菌积累等问题。目前,抗病品种在土传病害防治方面短期内虽能取得很好的效果,但随着土传病原菌的累积,存在抗病品种无法抵御土传病原菌侵染的远期风险<sup>[3]</sup>。土壤微生物是土体中最丰富的生物群体,在维持土壤健康与农业绿色发展方面发挥着重要作用<sup>[22]</sup>。随着“植物-根系-根际-菌丝际-土体及微生物”根际命运共同体<sup>[23]</sup>、根际免疫<sup>[24]</sup>和土壤-植物反馈<sup>[25]</sup>等作物-土壤互作理论的提出,土壤微生物组在控制土传病害、消减连作障碍方面表现出巨大的潜力,为消除十字花科作物根肿病提供了重要的生态防控手段。

从根肿病发生区域看,以昆明为中心,逐渐扩散至玉溪市、楚雄州、大理州。目前,尚无可完全根治十字花科作物根肿病的方法。近年来,有学者研究发现,在没有生物防治剂的情况下通过漂浮育苗系统来控制幼苗生长可延迟土传病原菌对寄主植物的侵染,与直接播种相比,使用该方法后,发病症状明显减轻<sup>[26]</sup>。卢美欢等<sup>[27]</sup>从云南温泉中筛选出1株埃及类芽孢杆菌,对软腐病病原菌具有较好的抑制效果,且能促进大白菜种子萌发和生长,具有很好的微生物农药开发前景。此外,解淀粉芽孢杆菌可以有效遏制软腐病病原菌的传播,减轻大白菜软腐病的发病程度<sup>[28]</sup>。微生物农药、生防菌、土壤原生动植物和土壤微生态平衡研究在防治大白菜土传病原菌侵染方面具有广阔前景。这些方法在通过有益菌与病原菌竞争营养、生态位等方式,创造不利于病原菌生存环境,一定程度上延缓了芸薹根肿菌对十字花科作物的侵染。但只要环境适宜,土壤中根肿菌休眠孢子就又开始萌发、侵染根部。只有重视大白菜病害的防控工作,在充分了解田间病害发生程度的情况下,有针对性地采取防控措施,研发

和推广新型生物防治、物理防治、农业防治为主和高效低毒的化学农药为辅的无公害防控技术,集成十字花科绿色综合防控技术,才能最大限度降低根肿病对十字花科作物的侵染和损害。

云南省十字花科蔬菜根肿病的复杂程度和致病性高于中国其他地区,导致根肿病防控难度大大增加<sup>[29]</sup>。新栽培模式下发生、致病的规律不清楚,高度依赖化学农药、致病机制缺乏深入研究等是导致云南省大白菜主产区根肿病发生流行的重要原因。目前解决土壤连作障碍多采用化学药剂或微生物技术等被动性措施,主要存在成本高、操作复杂、容易造成二次污染、破坏植物生长的根际环境等问题,且主要靠政府项目资金进行推广应用,实用性差。土壤熏蒸<sup>[13]</sup>、微囊包埋技术<sup>[30]</sup>等防治根肿病虽有一定效果,但实际生产中难以大面积推广应用。土壤消毒+生物有机肥+生物菌基质育苗+菌剂追施,能够基本解决死苗烂棵和根病问题,全面和平衡施肥+合理灌溉可壮苗增产<sup>[31]</sup>。此外,基质栽培模式在破解土壤连作障碍、营造植物生长良好的根系生长环境方面亦表现出巨大潜力<sup>[32]</sup>。调控环境、促进作物生长、提高作物“免疫力”,使作物保持健康生长状态,从而避免被“感染”是防治作物土传病害的基本思路。探索就地取材、低成本、环境友好、技术操作简单、实用性强、可以实现蔬菜无障碍换茬且不需要项目资金支持的十字花科根肿病绿色综合防控技术,才能被广大农户自觉推广应用。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

通过对祥云县、嵩明县、通海县、陆良县、晋宁县等云南省主要叶菜(大白菜、上海青、生菜、油麦菜)产区的调查,发现云南省主要叶菜产区以大白菜为主要栽培种类,且生产中存在品种相对单一、茬口密集、效益不稳等问题。这些地区复种指数高,年均可达6~7茬,连作普遍,以大白菜、小白菜的连作较为常见,导致根肿病发生面积逐渐扩大,危害程度不断加剧。霜霉病、灰霉病、白粉病、病毒病等在云南省各保护地蔬菜产区局部发生,危害程度中等,根肿病在云南十字花科主产区均有发生,危害程度中等,局部偏重。目前,暂无可完全根除大白菜根肿病的方法,对病害发生进行早期诊断,了解病害的流行、发生规律和危害程度,针对根肿病早期进行有针对性的防控措施,才能实现根肿病高效防控,进而降低损失。

### 4.2 展望

**4.2.1 从根际微生态角度解析根肿菌入侵作物过程中的生存与致病机制** 基于根际命运共同体、根际免疫和土壤-植物反馈等土壤微生物组与土体、作物互作理论,系统理解根肿菌在土壤环境中生存、传播、增殖和侵染十字花科作物根系过程,了解土壤理化性质、大量、中微量营养元素丰缺、诱导植物产生免疫、增强抗性相关酶对根肿菌生存和侵染的影响以及优化根肿菌与其他土壤微生物之间的竞争关系,对从根际微生态角度消减十字花科作物连作障碍尤为关键。

**4.2.2 抗病品种的发掘与利用** 培育和种植抗病品种是防控作物土传病害较经济有效且对环境友好的途径。对现有品种进行抗性鉴定分类,鉴定新的抗根肿病种质并发掘其主效抗性将有效遏制十字花科作物根肿病的危害和蔓延。利用高通量和下一代测序技术对抗根肿病基因进行精确定位和图位克隆,是创制和培育抗病优质新品种的基础和关键。通过遗传学和基因组学手段解析抗病性和优良农艺性状形成的遗传学基础,创制和培育适于我国大白菜主产区的高产、抗病、抗逆种质资源和新品种,必将有利于大白菜根肿病的遗传改良及十字花科作物产业的可持续健康发展。此外,随着作物与病原菌互作机制、致病机制研究的逐步深入,病原菌辅助作物抗病育种技术在防控十字花科作物根肿病中将发挥重要作用。

**4.2.3 基于健康栽培的十字花科作物根肿病治理理论与实践探索** 现代农业是在经济利益驱动下的对土地资源的掠夺式经营,很多病害是“种”出来的<sup>[33]</sup>。以调控土壤环境、促进作物生长和提高作物免疫力为目标,通过健康土壤培育结合生物防治、水肥控制、植物免疫诱抗技术和生物基因工程等技术,客观认识病害发生情况,制定根肿病发生风险预警依据,排查潜在风险,合理制定和调整种植计划或提前制定防控措施,必将有利于解析根肿病的发病机制,为根肿病基础研究与防控应用提供理论和技术支持。

### 参考文献

- [1] ZAYED A, SHEASHEA M, KASSEM I A A, et al. Red and white cabbages: An updated comparative review of bioactives, extraction methods, processing practices, and health benefits[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 17: 1-18.
- [2] 云南省统计局. 云南统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 145-175.
- [3] 蔡祖聪, 黄新琦. 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究

- 究[J].土壤学报,2016,53(2):305-310.
- [4] 韦中,宋宇琦,熊武,等.土壤原生动物的研究方法及其在土传病害防控中的作用[J].土壤学报,2021,58(1):14-22.
- [5] PANTH M, HASSLER S C, BAYSAL-GUREL F. Methods for management of soilborne diseases in crop production[J]. Agriculture, 2020, 10(1): 1-21.
- [6] HU Y L, QIU L, ZHANG Z J, et al. Control of *Streptomyces alfalfae* XY25<sup>T</sup> over clubroot disease and its effect on rhizosphere microbial community in Chinese cabbage field trials[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 641556.
- [7] BAYSAL-GUREL F, KABIR N. Comparative performance of fungicides and biocontrol products in suppression of rhizoctonia root rot in vibernum[J]. OMICS Publishing Group, 2018, 9(9): 2157-7471.
- [8] 严位中,杨家鸾,孙道旺,等.云南十字花科蔬菜根肿病发生规律及防治技术研究[J].石河子大学学报(自然科学版), 2004(S1): 118-122.
- [9] 孟金贵,张乃明.云南省设施蔬菜生产可持续发展问题的探讨[J].中国农学通报,2005,21(3):243-244.
- [10] 李省印.西安地区大白菜主要病害发生原因调查[J].北方园艺,1989(9):29-32.
- [11] SIEMENS J, NAGEL M, LUDWIG-MULLER 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 (11/12): 592-605.
- [12] 桑利伟,谭乐和,刘爱勤,等.海南省胡椒主要病害现状初步调查[J].植物保护,2010,36(5):133-137.
- [13] LIU C M, YANG Z F, HE P F, et al. Fluazinam positively affected the microbial communities in clubroot cabbage rhizosphere[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108519.
- [14] DIXON G R. Managing clubroot disease (caused by *Plasmodiophora brassicae* Wor.) by exploiting the interactions between calcium cyanamide fertilizer and soil microorganisms[J]. The Journal of Agricultural Science, 2017, 155(4): 527-543.
- [15] LI J H, PHILP J, LI J H, 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): 8091325.
- [16] LAN M, LI G, HU J, et al. iTRAQ-based quantitative analysis reveals proteomic changes in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.) in response to *Plasmodiophora brassicae* infection[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 1-13.
- [17] COOK W R I, SCHWARTZ E J. The life-history, cytology and method of infection of *Plasmodiophora brassicae* Woron., the cause of finger- and-toe disease of cabbages and other crucifers[J]. Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences, 1930, 218: 283-314.
- [18] HLAVJENKA V, SEIDENGLANZ M, DUFEK A, et al. Spatial distribution of cabbage root maggot (*Delia radicum*) and clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in winter oilseed rape crops in the czech republic[J]. Plant Protection Science, 2017, 53 (3): 159-168.
- [19] KAGEYAMA K, ASANO T. Life cycle of *Plasmodiophora brassicae*[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 28(3): 203-211.
- [20] YANG X X, HUANG X Q, WU W X, et al. Effects of different rotation patterns on the occurrence of clubroot disease and diversity of rhizosphere microbes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2265-2273.
- [21] 郭清云,汪波,蒯婕,等.油菜感抗品种混播对根肿病防控效果的影响[J].作物学报,2020,46(5):725-733.
- [22] 张俊伶,张江周,申建波,等.土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J].土壤学报,2020,57(4):783-796.
- [23] 申建波,白洋,韦中,等.根际生命共同体:协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J].土壤学报,2021,58(4): 805-813.
- [24] 韦中,沈宗专,杨天杰,等.从抑病土壤到根际免疫:概念提出与发展思考[J].土壤学报,2021,58(4):814-824.
- [25] 周新刚,马海鲲,郭辉,等.植物-土壤反馈理论及其在连作障碍管理中的应用[J].科技导报,2022,40(3):32-40.
- [26] OSHIERA M, KAUZNA M, KOWALSKA B, et al. *Pectobacterium carotovorum* subsp. *odoriferum* on cabbage and chinese cabbage: Identification, characterization and taxonomic relatedness of bacterial soft rot causal agents[J]. Journal of Plant Pathology, 2017, 99(1): 149-160.
- [27] 卢美欢,李利军,马英辉,等.埃吉类芽孢杆菌 SWL-W8 的鉴定及其对白菜软腐病的生物防治效果[J].农药学报,2020, 22(5): 791-800.
- [28] CUI W Y, HE P J, MUNIR S, et al. Biocontrol of soft rot of Chinese cabbage using an endophytic bacterial strain[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1471.
- [29] LIU C M, YANG Z F, HE P F, 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.
- [30] 黄颖.三种植物活性物质复配微囊剂对草莓灰霉的防控研究[D].天津:天津农学院,2020.
- [31] 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.
- [32] 崔艳艳,何朋杰,杨丽娟,等.解淀粉芽孢杆菌 B9601-Y2 对大白菜软腐病防治效果研究[J].植物保护,2020,46(2):112-116.
- [33] 李世东.植物医学:我国农业现代化进程中的病害治理挑战、机遇和创新[J].植物保护,2022,48(2):1-8.