

案例二十三 蔬菜连作障碍生态修复技术

贺字典 高玉峰

【案例说明】

蔬菜生产上过量使用化肥、农药一方面造成土壤酸化、次生盐渍化、土壤板结、病虫害严重发生等问题，另一方面过量使用农药防治土传病害造成蔬菜产品农药残留超标，杀死土壤有益微生物造成土壤微生物种群平衡关系被打破致使土壤理化性质恶化更为严重，土传病害发生率越治越严重的恶性循环中。如何打破这一个怪圈，利用有益根际微生物有效调控蔬菜根际微生态，使其向有益于植物生长而有利于病原菌繁殖的方向变化，从而使蔬菜连作土壤成为健康的有机体提供了一个很好的研究思路。本案例运用案例编写者的科研数据详细分析的连作土壤中微生物种群的失衡，运用木霉修复蔬菜连作土壤的效果。适用于资源利用与植物保护领域硕士学位研究生。

【背景】

河北省是蔬菜生产大省，全省蔬菜总产量在 5000 万吨以上，居全国第四位，大白菜、黄瓜、番茄、辣椒、卷心菜、茄子、白萝卜和菠菜的种植面积占河北省蔬菜总种植面积的比重超过 60%，总产量占比 70%以上。形成了鸡泽辣椒、乐亭甜瓜、青县羊角脆甜瓜、玉田包尖白菜、崇礼彩椒、平泉黄瓜、永年大蒜、馆陶黄瓜、昌黎旱黄瓜、永清胡萝卜十一个特色农产品优势区和生姜、大葱、叶菜等区域特色产区。连作障碍通常指在同一块土地上连续种植同种或同科蔬菜后，即使进行正常的栽培管理，也会出现生长受阻、产量下降、品质变劣、病虫害加重等现象。其严重程度主要体现在以下几个方面：

1、土壤理化性质恶化：长期连作会导致土壤养分失衡，如碱解氮、有效磷、速效钾等大量积累，但利用率降低；同时引发土壤酸化（如浙江省调查发现 33.7%的规模化蔬菜基地土壤 $\text{pH} \leq 5.0$ ）和次生盐渍化（42.6%的基地土壤 EC 值 $> 1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）。

2、土壤生物学环境退化：连作土壤微生物区系失衡，有害微生物（如尖孢镰刀菌、丝核菌属等土传病原菌）大量富集，而有益微生物（如部分拮抗菌、养分转化菌）减少。土壤酶活性（如蔗糖酶、磷酸酶）后期常急剧降低。

3、病虫害爆发加剧：土传病害根结线虫、根腐病、茎基腐病、白绢病、菌核病、根肿病等土传病害发病率显著上升，平均可达 17.82%，导致平均减产 22.12%，严重年份甚至绝收。自毒物质积累与病原微生物协同作用，进一步加剧障碍发生。

4、经济效益与生态效益双损：连作障碍不仅造成严重的经济损失（如山东、河南等地推广防控技术后亩均仍可能减产 30%-50%，还因过度还因过度依赖化学农药和肥料，增加了面源污染和土壤污染风险。因此，开展对蔬菜连作障碍生态修复技术，对推动我省乃至全国蔬菜产业发展具有重大意义。

【教学重点】

- 1、连作障碍的多成因性：理解其是微生物、理化性质、自毒物质共同作用的结果。
- 2、“灭-建-抗”技术体系的内在逻辑：掌握“消毒创造空白生态位→接种有益微生物构建健康群落→诱导植物抗性”这一核心思路。
- 3、微生物群落调控的核心地位：深刻理解土壤健康的核心是微生物健康，生物防治是根本出路。
- 4、技术的综合性与实用性：学会根据不同障碍程度，灵活组合应用各项技术。

【教学难点】

- 1、土壤微生态的“黑箱”特性：微生物群落变化看不见摸不着，如何让学生理解其复杂互作关系及调控原理。
- 2、技术效果的稳定性问题：分析为何同样的菌剂在不同田间环境下效果差异大，引导学生思考如何提高菌剂定殖率和效果稳定性。

3、从机理到应用的跨越：如何将实验室的微生物学、生态学理论转化为农民可操作、愿接受的具体农艺措施。

4、成本效益分析：引导学生核算技术投入与产出，理解技术的经济可行性是推广的关键。

【案例内容】

一、目前蔬菜连作障碍的修复技术

(一) 土壤消毒技术

1、物理消毒：如高温闷棚（利用夏季高温密闭大棚）、土壤热水消毒（燃煤式热水消毒对根线虫防治率达 95%以上）、蒸汽消毒等。这些方法能有效杀灭土壤中多种病原菌、虫卵及杂草种子。

2、化学消毒：使用棉隆等化学熏蒸剂。虽然效果较好，但存在环境污染风险、操作安全性要求高及可能破坏土壤微生态平衡等问题。

(二) 农业生态栽培技术

1、合理轮作与间套作：应用化感作用原理，采用“毛葱-黄瓜”等伴生栽培模式，可使蔬菜平均产量提高 26.2%。

2、土壤改良与培肥：增施有机肥、生物有机肥（如添加木霉菌、枯草芽孢杆菌等制剂）

3、使用生物炭吸附自毒物质（消减率达 80%以上）

4、种植绿肥等，以改善土壤结构，提高土壤肥力和生物活性。

5、水肥一体化与精准管理：采用肥水气一体化施用装置，实现节水 60%、节肥 30%，减少养分淋失和盐分积累。

(三) 生物修复技术

1、微生物菌剂应用：施用含有益微生物（如木霉菌、芽孢杆菌、丛枝菌根真菌等）的菌剂，通过竞争作用、拮抗作用、诱导系统抗性机制抑制土传病害。例如，利用丛枝菌根真菌的蔬菜菌根苗技术用于消毒后的土壤微生物恢复。

2、抗性品种选用与嫁接技术：选用抗土传病害的品种或采用嫁接技术（如以抗病的南瓜、葫芦为砧木嫁接黄瓜），有效减轻病害发生。

3、生态型土壤修复剂：开发和应用无污染的生态型土壤修复剂，结合有机土栽培模式，克服连作障碍。

二、木霉菌对蔬菜连作障碍的修复技术

1、不同种植年限蔬菜根际微生物种群分布动态

在河北省蔬菜保护地土壤中细菌为优势微生物种群，数量在 $2.03\times10^7\sim3.42\times10^7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ ，在微生物总量中所占比例最多，均在95%以上，其次是放线菌，数量在 $3.05\times10^5\sim1.15\times10^6\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。真菌所占比例最少，土壤真菌数量在 $7.83\times10^3\sim28.71\times10^3\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。随着种植年限的增长，土壤真菌数量逐渐增多，在微生物总量中所占的比例呈上升趋势：当种植年限在1~5年时，土样中真菌数量相对较少，占微生物总量的0.029~0.04%，但当种植年限增加到15年以上时，土壤真菌的数量在整个微生物总量中上升为0.098~0.12%，放线菌的比例与种植年限的关系不是特别大，从1~20年棚，放线菌占微生物总量的比例差异不大（表1）。细菌的比例随着种植年限的延长呈现出下降趋势，随着种植年限的延长，土壤逐渐真菌化。

表 1 不同种植年限土样土壤微生物的数量

种植年限	真菌数量 ($\times10^3\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)	所 占 百 分 数 %	细菌数量 ($\times10^7\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)	所占 百分数 %	放线菌 ($\times10^5\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)	所占 百分数 %
1	7.83 g	0.029	2.57d	98.25	3.8f	1.45
2	8.75 f	0.037	2.35 e	98.36	3.05 f	1.28
3	12.5f	0.04	2.97c	96.11	11.9a	3.85
5	13.17 g	0.05	2.04 f	96.89	6.4d	3.03
7	14 e	0.05	2.52 d	97.88	5.3 e	2.06

8	16.13e	0.07	2.09f	95.79	9.03b	4.14
10	18.82 d	0.06	3.18b	98.27	5.32e	1.64
12	20.38d	0.075	3.05b	97.34	8.1c	2.59
15	24.56c	0.098	2.42 e	97.27	6.55 d	2.63
18	26.33b	0.10	2.35e	96.44	8.4c	3.45
20	29.71a	0.12	3.43 a	96.78	11.59 a	3.10

2、不同连作年限蔬菜根际土壤真菌种群多样性影响因素

曲霉菌、镰孢菌和木霉菌在不同种植年限的土壤中均能分离到，种植年限对曲霉菌的影响不大，种植年限在 1~8 年时，木霉菌数量与种植年限关系不是非常密切，但当种植年限超过 10 年以后，木霉菌数量受到了较大影响，频度由原来的大于 100%下降到 75%。1 年棚，真菌为 41 个种，20 年棚，真菌仅为 9 个种，最为突出的是 20 年棚中镰孢菌的频度为 175%（表 2），说明其数量在逐渐上升，是造成多种土传病害加重的原因之一。

表 2 真菌种在不同种植年限土样中出现的频度

真菌种类	种植年限										
	1	2	3	4	5	8	10	12	15	18	20
疫霉属 <i>Phytophthora</i>	0	0	0	0	8.33	0	0	20	31	35	42
被孢霉属 <i>Mortierella</i>	0	0	7.69	8.03	9.05	7.14	0	0	0	0	0
毛霉属 <i>Mucor</i>	0	12.5	0	6.67	0	0	20	0	0	0	0
毛壳属 <i>Chaetomium</i>	11.11	0	15.38	0	0	14.28	0	0	0	0	0
青霉属 <i>Penicillium</i>	0	0	84.62	20	16.67	21.43	20	40	0	10	0
枝顶孢属 <i>Acremonium</i>	0	0	0	0	0	7.14	10	20	0	0	0
漆斑菌属 <i>Myrothecium</i>	0	0	7.69	0	0	0	10	0	0	0	0
细基束梗霉属 <i>Stysanus</i>	11.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
炭疽菌属 <i>Colletotrichum</i>	0	0	7.69	0	0	0	10	0	0	0	0
圆酵母属 <i>Torula</i>	0	0	7.69	0	0	0	0	0	0	0	0
共头霉属 <i>Syncephalastrum</i>	0	0	0	0	8.33	0	0	0	0	0	0
链格孢属 <i>Alternaria</i>	0	0	7.69	0	0	7.14	0	0	0	50	0
粘帚霉属 <i>Gliocladium</i>	0	0	0	0	8.33	0	0	0	0	0	0
被毛枝葡萄孢属 <i>Botryotrichum</i>	0	12.5	23.07	0	16.67	0	0	0	0	0	0
毁丝霉属 <i>MyceLiophthora</i>	0	0	0	0	8.33	0	0	0	0	0	0
金孢属 <i>Chrysoporium</i>	0	0	15.38	0	0	7.14	0	0	0	0	0
轮枝菌属 <i>Vertillium</i>	11.11	0	7.69	0	7.98	7.14	9.05	12.96	13.09	14.00	15.03
弯颈霉 <i>ToLypocladium</i>	0	0	0	0	8.33	0	0	0	0	0	25

葡萄穗霉属 <i>Stachybotrys</i>	11.11	12.5	38.46	6.67	0	0	0	0	0	0	0
丝核菌属 <i>Rhizoctonia</i>	0	1.45	2.90	3.09	4.00	16.98	17.94	20.65	21.85	23.98	25
曲霉属 <i>Aspergillus</i>	144.44	100	238.46	93.33	116.67	121.43	80	140	33.33	300	75
镰孢菌属 <i>Fusarium</i>	20	37.5	223.07	40	50.00	100	100	100	100	100	175
木霉属 <i>Trichoderma</i>	122.22	120	100	33.33	83.33	28.57	133.33	75	40	50	75
腐质霉 <i>Humicola</i>	0	0	15.38	0	0	0	10.0	0	0	0	0
头孢霉 <i>Cephalosporium</i>	0	12.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3、健株与罹病植株根际微生物的差异

(1) 尖孢镰孢菌 (*F.oxysporium*) 罹病与健康植株根际微生物多样性的差异将传统特异性培养基稀释分离法与荧光定量 PCR (RT-PCR) 和磷脂脂肪酸 (PLFA) 技术相结合, 测定尖孢镰孢菌数量 DNA 拷贝数、细菌总量和真菌总量后表明, 从黄瓜幼苗期到生长末期, 枯萎病罹病植株根际尖孢镰孢菌的数量分别为 3.73×10^8 cfu/g、 3.47×10^8 cfu/g、 3.46×10^8 cfu/g、 2.78×10^8 cfu/g 和 1.55×10^8 cfu/g, 是健康植株的 4.24、2.39、2.56、2.78 和 1.15 倍。同样尖孢镰孢菌 DNA 拷贝数罹病植株分别是健康植株的 2.91、31.99、1.58、7.15 和 4.61 倍。黄瓜枯萎病健康植株根际细菌总量和微生物群落相对丰度均显著高于罹病植株, 真菌总量为罹病植株显著高于健康植株, 微生物群落相对丰度罹病植株是健康植株 60.00%、45.17%、60.34%、62.23%和 58.62% (表 3)。

表 3 黄瓜枯萎病罹病和健株根际微生物数量和群落丰度

生育期	罹病 与否	尖孢镰孢菌 数量 ($\times 10^8$ cfu/g)	尖孢镰孢菌 DNA 拷贝数(ng/ μ L)	细菌总量 (nmol/g)	真菌总量(nmol/g)	微生物群落 相对丰度
苗期	罹病	3.73 $\pm$ 0.24a	61.91 $\pm$ 2.56b	47.89 $\pm$ 2.75e	36.70 $\pm$ 5.51b	1.20 $\pm$ 0.32d
	健康	0.88 $\pm$ 0.03d	21.28 $\pm$ 0.45d	116.50 $\pm$ 22.00c	16.40 $\pm$ 1.54c	2.00 $\pm$ 0.02b
速长期	罹病	3.47 $\pm$ 0.78a	720.75 $\pm$ 23.73a	110.41 $\pm$ 8.37c	41.79 $\pm$ 5.47a	1.03 $\pm$ 0.07d
	健康	1.45 $\pm$ 0.23c	22.53 $\pm$ 1.54d	140.20 $\pm$ 22.84b	31.10 $\pm$ 2.39b	2.28 $\pm$ 0.26a
开花期	罹病	3.46 $\pm$ 0.34a	38.89 $\pm$ 3.55d	74.32 $\pm$ 6.20c	41.33 $\pm$ 2.84a	1.05 $\pm$ 0.05d
	健康	1.35 $\pm$ 0.23c	24.62 $\pm$ 4.33d	82.70 $\pm$ 14.32d	26.79 $\pm$ 1.08bc	1.74 $\pm$ 0.06c
盛果期	罹病	2.78 $\pm$ 0.56b	298.60 $\pm$ 4.88b	50.47 $\pm$ 1.90e	41.33 $\pm$ 2.84a	1.45 $\pm$ 0.05c
	健康	1.00 $\pm$ 0.14cd	41.74 $\pm$ 0.32d	77.82 $\pm$ 17.62d	23.77 $\pm$ 4.71bc	2.33 $\pm$ 0.06a
生长末期	罹病	1.55 $\pm$ 0.346c	84.62 $\pm$ 9.43b	153.15 $\pm$ 16.50bc	54.12 $\pm$ 2.84a	1.19 $\pm$ 0.02d
	健康	1.35 $\pm$ 0.24c	18.36 $\pm$ 2.55d	170.64 $\pm$ 6.33a	50.11 $\pm$ 2.28a	2.03 $\pm$ 0.04b

(2) 茄腐镰孢菌 (*F.solani*) 罹病与健康植株根际微生物多样性的差异

通过对黄瓜根腐病苗期和成株期罹病植株和健康植株根际土壤真菌 ITS 高通量测序后表明黄瓜根腐病幼苗罹病植株根际真菌属以 *Plectospaerella*、*Fusarium*、*Microascus*、*Botryotrichum* 为主, 其次是 *Verticillium*、*Ovatospora* 和 *Trichoderma* 等属真菌; 健株则以 *Aspergillus*、*Acremonium*、*Clodotrhinum*、*Penicillium*、*Chrysosporium* 为主, 其次是 *Trichoderma*、*Humicola* 等属真菌。成株期罹病植株真菌种类比较均匀, *Sodiomyces* 和 *Conocybe* 较多, 而健株根际的 *Conocybe* 和 *Fusarium* 属真菌则占优势 (图 1)。黄瓜苗期和成株期根际土壤真菌的 Simpson 指数罹病植株与健康植株间的差异均达到显著水平, 而 CHAO1 则是苗期显著, 成株期不显著。影响黄瓜根腐病发生的主要因素中第一因素占 49.3%, 第二因素占 13.9%。而且成株期罹病植株与健株间根际真菌多样性受到第一因素较大, 而苗期根腐病的发生受到第二因素的影响较大。(图 2)。

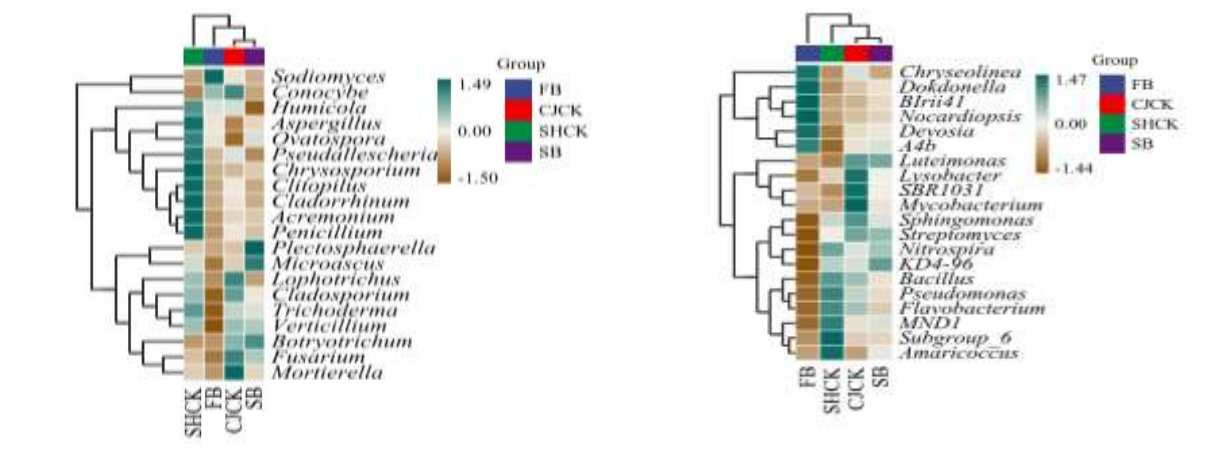


图 1 黄瓜根腐病罹病与健株根际真菌和细菌热图

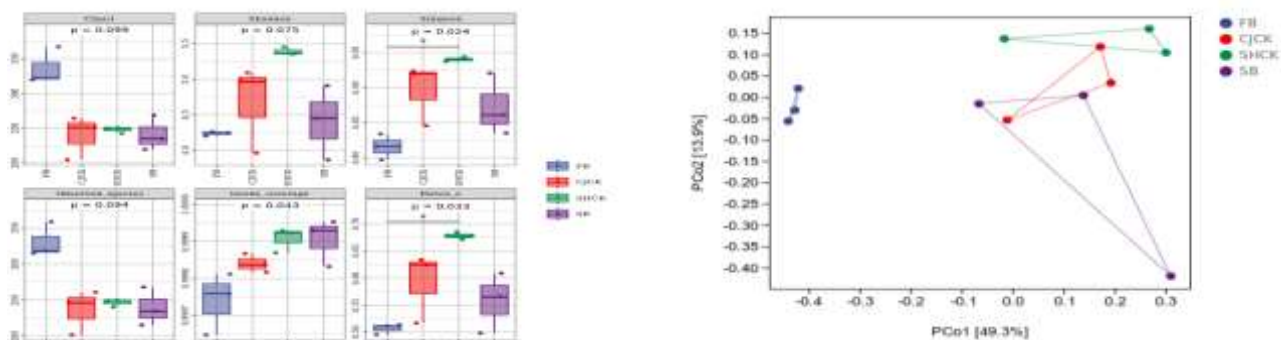


图 2 真菌 α 多样性指数和 β 多样性指数

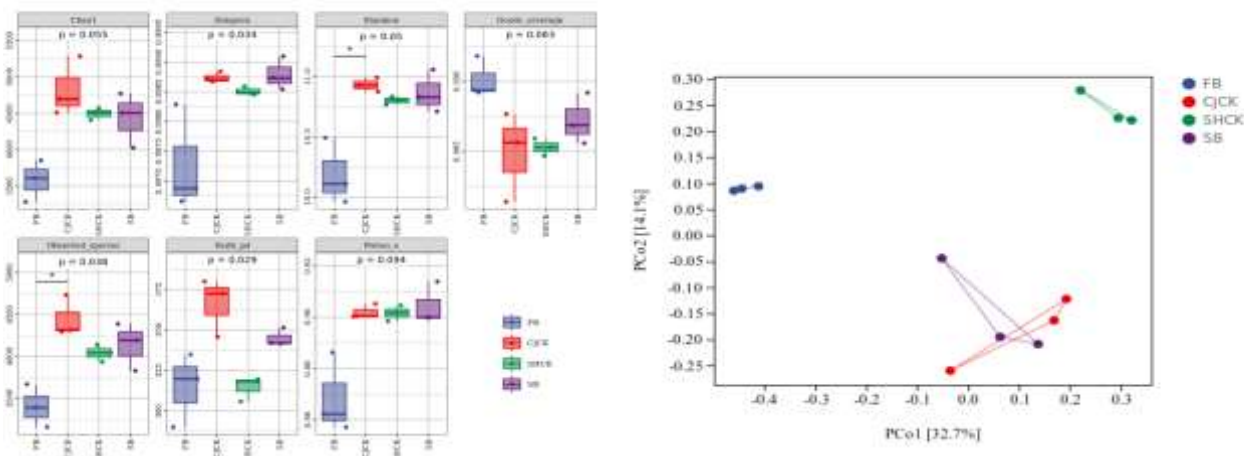


图 3 黄瓜根腐病罹病与健株根际细菌真菌 α 多样性指数和 β 多样性指数

在所有样品中检测出排名靠前 10 名的属分别为: *Pseudomonas*、*Blrii*、*Lyoabacter*、*Flavobacterium*、*Bacillium*、MND1、*Luteimonas*、*Nocardiopsis* 和 SBR1031。不管是苗期还是成株期，黄瓜健株比病株根际土壤中的 *Pseudomonas* 要多。

4、连作蔬菜根际木霉菌种群多样性

从河北省 11 个地市 165 个番茄、黄瓜、辣椒、菜豆、菠菜、生姜、茄子、白菜等连作蔬菜土壤根际土壤中分离鉴定了 971 株木霉菌，采用形态学、UP-PCR、ITS 和 TEF 序列鉴定出长枝木霉

(*Trichoderma longibrachiatum*)、拟康氏木霉 (*Trichoderma pseudokoningii*)、黄绿木霉 (*Trichoderma aureoviride*)、棘孢木霉 (*Trichoderma asperellum*)、深绿木霉 (*Trichoderma atroviride*)、哈茨木霉 (*Trichoderma harzianum*)、非钩木霉 (*Trichoderma inhamatum*)、微孢木霉 (*Trichoderma minutisporum*)、长孢木霉 (*Trichoderma longipile*)、粘绿木霉 (*Trichoderma virens*) 和中国新记录种螺旋木霉 (*Trichoderma helicum*)。分离频率分别为：长枝木霉 (*T. longibrachiatum*) 11.51%、深绿木霉 (*T. atroviride*) 9.09%、哈茨木霉 (*T. harzianum*) 8.48%、粘绿木霉 (*T. viren*) 6.06%、微孢木霉 (*T. minutisporum*) 5.45%、拟康木霉 (*T. pseudokoningii*) 4.85%、黄绿木霉 (*T. aureoviride*) 4.24%、非钩木霉 (*T. inhamatum*) 3.08%、棘孢木霉 (*T. asperellum*) 3.03%、长孢木霉 (*T. longipile*) 0.60%、螺旋木霉 (*T. helicum*) 0.60% (图 4 图 6)

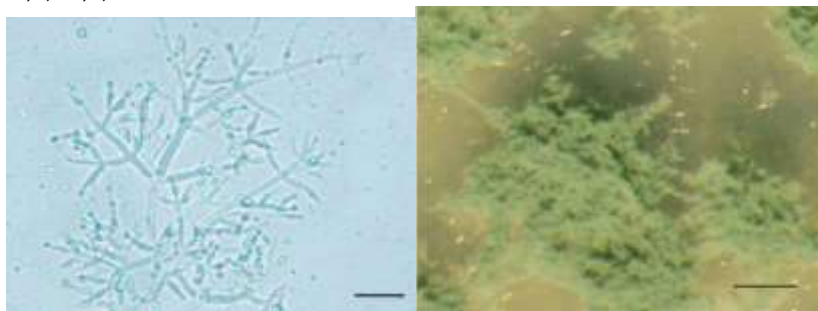


图 4 棘孢木霉 (*Trichoderma asperellum*) 分生孢子梗和分生孢子簇

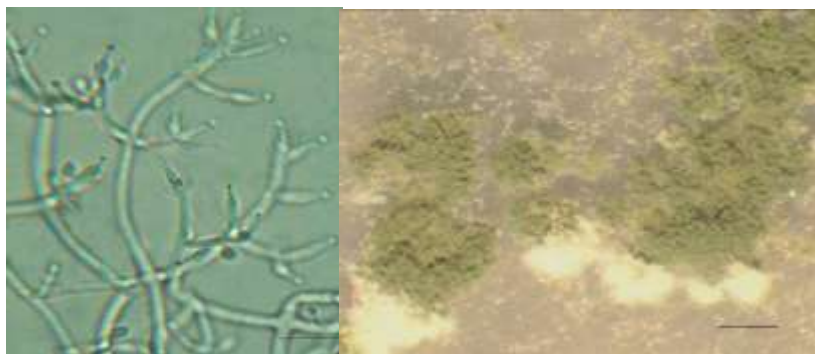


图 5 深绿木霉 (*Trichoderma atroviride*) 分生孢子梗和分生孢子簇

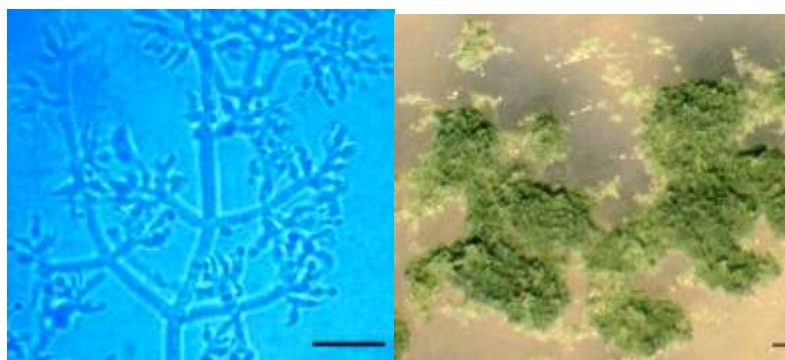


图 6 哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)的分生孢子梗和分生孢子簇

5、杀菌剂对木霉菌的毒力作用

过量施用化肥造成土壤酸化和次生盐渍化问题，因此选择对化肥适应性强的木霉菌株对于修复蔬菜连作障碍效果至关重要。尿素对两个菌株产孢量影响比较大，尿素加入之后降低 pH，从而抑制了木霉菌分子孢子的产量，钾肥和复合肥不仅促进了菌丝生长速度，而且菌株 TRS060186 的分子孢子数量明显超过对照，差异达显著水平，说明该菌株有一定的耐肥性。但菌株 TRW079634 只是菌丝生长速度加快，孢子数量低于对照 (表 4)。

表 4 土壤盐分对木霉菌菌丝生长和产孢量的影响

肥料种类	生长量	木霉菌株	
		TRS060186	TRW079634
尿素	菌落直径(cm)	5.20±0.21	5.90±0.34
	产孢量(10 ⁸ /g)	0.29±0.03c	0.36±0.01c
钾肥	菌落直径(cm)	4.83±0.05	6.08±0.57
	产孢量(10 ⁸ /g)	4.56±0.04a	1.48±0.02b
复合肥	菌落直径(cm)	4.57±0.43	6.40±0.45
	产孢量(10 ⁸ /g)	4.12±0.02b	1.81±0.03a
CK	菌落直径(cm)	5.21±0.06	5.63±0.09
	产孢量(10 ⁸ /g)	3.95±0.03c	1.90± 0.03a

蔬菜枯萎病、灰霉病、叶霉病和晚疫病发生比较严重，常用苯并咪唑类、二甲酰亚胺类、羧酸氨基化合物类和氨基甲酸酯类杀菌剂，从中选择代表性的杀菌剂对木霉菌进行了抗药性测定。TRW079634 对不同类型的杀菌剂的抗性不同：对多菌灵敏感程度最高，EC₅₀ 仅为 0.312 μg/mL，其次是克得灵和多抗霉素；而对克露抗性最强，EC₅₀ 为 129.217 μg/mL。克露是由霜脲氰和代森锰锌复配而成的内吸性杀菌剂，对霜霉、疫霉、腐霉等病原真菌引起的病害有良好的治疗和预防作用，因此，今后可将木霉菌与该类药剂进行复配或同时使用，达到同时防治多种病害的目的。同样，TRS060186 对取代脲类内吸性杀菌剂异菌脲、克露和烯酰吗啉有较强的抗性，对多菌灵、多抗霉素的抗性较差，但耐多菌灵能力比 TRW079634 要强（表 5）。

表 5 木霉菌 TRS060186 对常用杀菌剂的抗性

杀菌剂	回归方程	相关系数 R ²	EC ₅₀ (μg/mL)	EC ₉₀ (μg/mL)
多抗霉素	Y=0.9253x + 0.7393	0.9551	0.999	14.685
多菌灵	Y=2.3077x + 1.2297	0.9962	0.512	2.899
克得灵	Y=1.5801x + 1.624	0.9289	3.368	33.272
克 露	Y=-1.3721x + 1.003	0.9995	5.431	33.978
乙霉威	Y=0.9645x + 3.8665	0.9922	3.238	20.488
异菌脲	Y=3.2282x - 1.5765	0.8818	6.156	33.792
烯酰吗啉	Y=0.5484x + 2.9531	0.9679	4.178	20.488

6、木霉菌对黄瓜根腐病的防治效果

表 6 棘孢木霉对黄瓜枯萎病的防治效果

接种处理	防治效果%
7 d	100.00±100.00a
14 d	100.00±100.00 a
28d	65.33±1.28 c
42 d	56.55±2.03 d
56 d	70.24±2.45 b
70 d	76.81±3.02 b
84 d	64.29±2.87 c
100 d	50.00±2.54 e
空白对照	-
清水对照	-

表中数据为平均数±标准差。同列不同字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。

施用棘孢木霉第 70 天、84 天和 100 天时，对黄瓜枯萎病的防治效果分别为 76.81%、64.29%和 50.00%，为此确定 90 天为棘孢木霉施用的临界期（表 6）。

7、木霉菌修复技术的优点

（1）环境友好：属于生物防治，减少化学农药使用，对环境安全，无残留毒性和污染问题。

持效期长：木霉菌在土壤中能够定殖和繁殖，表现出持续的控制效果，有利于土壤微生态的长期健康。

多重功效：兼具防病、促生、改良土壤等多重功能，一举多得。

不易产生抗药性：作用机制多样，不易使病原菌产生抗药性。

兼容性好：常可与有机肥、生物炭等土壤改良材料结合使用，形成协同效应。

（2）木霉菌修复技术的局限性

效果受环境因素影响大：其防效受土壤温度、湿度、pH 值、有机质含量等环境条件影响较大。环境不适宜时，菌剂存活和定殖困难，效果不稳定。

见效相对较慢：相比化学农药，其防治效果显效速度较慢，不适合在病害爆发后作为急救措施。

菌株特异性强：不同木霉菌株的抑菌谱和适应性不同，需要针对特定病原和土壤条件筛选高效菌株。

生产工艺和储存要求高：活菌制剂的生产、制剂化、储存和运输过程都需要严格控制条件以保持菌株活性，成本相对较高。

可能与其他微生物相互作用：施入土壤后可能与其他土著微生物或农用微生物发生复杂的相互作用，效果存在不确定性。

【问题】

- 1、微生物修复连作障碍的作用机理是什么？
- 2、修复效果评价指标是什么？
- 3、连作障碍修复技术集成度如何发挥？实际应用的可行性？

【教学过程设计】

提前一周将案例材料发给学生，学生查阅连作障碍原因与修复技术的文献。

1、情境导入（15 分钟）

播放一段视频，展示山东寿光或江苏淮安某地因连作障碍导致黄瓜/西瓜大面积枯死的惨状，菜农面临巨大损失。提出问题：“这块地得了‘癌症’，还能治吗？怎么治？”

2、案例呈现与小组探究（30 分钟）

将学生分为“植病组”、“土壤组”、“微生物组”、“栽培组”。

任务：各组从自身角色出发，分析连作障碍成因，并研讨“灭-建-抗”技术体系中每一步骤的科学原理和必要性。

植病组：分析消毒如何切断病原传播链。

土壤组：分析消毒和有机肥对土壤理化性质的影响。

微生物组：核心任务，解读微生物群落变化图谱，分析有益菌如何“占位”抑制病原菌。

栽培组：设计一套具体的田间操作方案和注意事项。

3、小组汇报与辩论（30 分钟）

各组汇报研讨结果。“微生物组”的汇报是重中之重，教师需引导其阐明微生物群落重构的核心作用。

教师扮演“质疑者”：“如果消毒不彻底怎么办？”“菌剂施下去没活下来怎么办？”“这套技术成本比只用农药高，农民为什么要用？”引发学生深入思考和辩论。

4、教师总结与提升（15 分钟）

教师系统梳理“灭-建-抗”技术体系，画龙点睛地强调“土壤微生物区系调控”是破解连作障碍的

“钥匙”。

展示该技术在全国推广应用的成效数据（增产、节药、增收），证明其有效性。

对比介绍 RDA 等物理化学修复技术的优缺点，突出生态优势和可持续性。

表 8 生态修复技术与 RDA 类物理/化学修复技术的比较

特征	生态修复技术	RDA 类物理/化学修复技术
核心原理	利用生物学原理，通过有益微生物调控土壤微生态	利用物理/化学原理（如氧化还原、电化学）直接降解污染物
作用方式	生态式、温和、持久。重建土壤生物平衡，实现自我维持。	靶向式、强烈、快速。直接破坏目标污染物（病原体、自毒物）。
优点	1. 环境友好，无二次污染。 2. 效果持久，能提升地力。 3. 兼具促生、提质、增产等多重效益。 4. 成本相对较低，农民易接受。	1. 见效极快，处理周期短。 2. 效果不受环境因素（温度、pH）影响。 3. 对特定污染物去除效率高，可控性强。
缺点	1. 见效相对较慢，需一定时间建立菌群。 2. 效果受土壤温湿度、有机质等环境因素影响。 3. 菌剂质量、施用技术要求高。	1. 治标不治本，无法重建土壤生态，易复发。 2. 设备昂贵，投资和运行成本高。 3. 可能破坏土壤有益菌群，造成“土壤真空”。 4. 可能产生化学副产物，有二次污染风险。
适用场景	大面积推广、可持续农业生产的首选	

【布置课后作业】

让学生为家乡的某个设施蔬菜基地设计一份连作障碍修复方案。