

大豆重迎茬研究进展

李 森<sup>1,2</sup>,姚 钦<sup>1</sup>,刘俊杰<sup>1</sup>,金 剑<sup>1</sup>,刘晓冰<sup>1</sup>,王光华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所/黑土区农业生态重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘 要:**大豆是我国重要的经济作物,随着国家作物种植结构的调整和大豆产业振兴计划的实施,大豆重迎茬种植现象在部分地区有抬头的倾向。大豆重迎茬种植是制约大豆产量的主要瓶颈问题,为了解决大豆种植行业面临的重迎茬问题,开展大豆重迎茬障碍机制及对策研究对于现代农业可持续发展具有重要的战略意义。本研究综述重迎茬种植在大豆、土壤环境和土壤与作物相互作用 3 个方面的研究进展,初步探讨重迎茬大豆化感物质和病原微生物的作用机制,着重阐述土壤微生物多样性和群落结构在重迎茬条件下的演变规律,并对未来的研究方向作以展望,以期为充分认识和解决大豆重迎茬问题提供理论基础和科学依据。

**关键词:**重迎茬;大豆;土壤环境;化感作用;土壤微生物

Research Progress on Continuous and Alternate Cropping of Soybean

LI Sen<sup>1,2</sup>, YAO Qin<sup>1</sup>, LIU Jun-jie<sup>1</sup>, JIN Jian<sup>1</sup>, LIU Xiao-bing<sup>1</sup>, WANG Guang-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the adjustment of national crop planting structure and the implementation of soybean industry revitalization plan, soybean, as an important cash crop in China, has been continuous cropping in some areas. Continuous cropping of soybean is the main bottleneck to restrict the yield of soybean. It is of strategic significance for the sustainable development of modern agriculture to carry out the research on the obstacle mechanism and countermeasures of soybean succession. In this study, the research progress of continuous cropping in soybean, soil environment and the interaction between soil and crops were reviewed, the mechanism of allelopathy and pathogenic microorganism of soybean were discussed, and the evolution rule of soil microbiota falling under the condition of continuous stubble was described emphatically, and the future research direction was prospected. All these are expected to provide the theoretical and scientific basis for fully understanding and solving the problem of continuous cropping of soybean.

**Keywords:** Continuous cropping; Soybean; Soil environment; Allelopathy; Soil microorganism

中国东北地区是大豆的主产区,大豆种植面积占全国的 41.37%,其中黑龙江省种植面积最广,平均种植面积在 18 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。由于耕地面积和市场需求的影响,大豆重迎茬种植在黑龙江省部分地区普遍存在。根据作物上下茬衔接方式的不同,大豆种植可分为正茬、迎茬和重茬。同一地块种植其它作物两年以上再种植该种作物,称作正茬。重茬,也称为连作,指的是在同一地块上,将同一作物年年连续种植的方式(豆-豆-豆-豆),而隔年重复种植则称为迎茬(麦-豆-麦-豆)<sup>[2-3]</sup>。大豆是对重迎茬种植敏感的典型作物之一,重迎茬种植极易恶化土壤理化性状,破坏土壤微生物区系平衡,诱发病虫害,最终导致严重的作物生长障碍<sup>[4]</sup>。大豆重迎茬种植造成的重茬障碍问题严重制约着中国

大豆体系生产力的提高,对中国大豆产业的可持续发展构成了很大威胁。早期在 20 世纪 90 年代,以外部特征病虫害着手研究,不断对土壤理化性状、植物生长发育与生理、产量和品质等指标进行测定分析,获得了大量成果。随着科技技术的进步,大豆重迎茬的深层机理不断被揭示,在诸多方面取得了新的突破性进展。本研究主要针对大豆重迎茬问题,重新总结相关研究成果,旨在为重迎茬大豆研究提供理论参考和科学依据。

1 重迎茬种植对大豆的影响

1.1 生长发育

重迎茬种植会严重阻碍大豆生长发育,延缓大豆叶片的生长速度,影响冠层叶片的不合理分布,

收稿日期:2019-07-08  
基金项目:国家重点研发计划(2017YFG200604)。  
第一作者简介:李森(1991-),男,博士,主要从事土壤微生物研究。E-mail:lisen18@mails.ucas.ac.cn。  
通讯作者:王光华(1966-),男,博士,研究员,主要从事分子微生物生态学和土传病害生物防治研究。E-mail:wanggh@iga.ac.cn。

降低叶片生长效率以及干物质积累速率<sup>[5]</sup>。大豆重茬种植不利于根系生长发育,主要体现在根系不发达、须根数量减少、根皮严重老化以及根部有效根瘤数量降低。研究发现,大豆有效根瘤干重,根系干重以及根容量随着重茬年限增加而降低。大豆重迎茬种植还会导致根冠比增加,根、冠干物质积累量降低,对于根系中的营养而言,显著降低了根系全钾含量,并且在大豆快速生长期全磷含量大量缺失<sup>[6]</sup>。王晶英等<sup>[7]</sup>认为造成重茬大豆根冠比增大和根、冠干物质积累量降低的主要原因是大豆重茬加重了病虫害,磷、钾等元素大量缺失,水分胁迫加重以及内源激素失调。

1.2 产量

重迎茬长期种植能够恶化大豆产量构成因子,

其中以单株荚数和粒数最为严重<sup>[8]</sup>。研究表明大豆重迎茬种植明显降低大豆产量,减产幅度为6.2%~35.4%<sup>[9]</sup>。根据文献报道汇总分析重迎茬大豆产量与正茬相比随连作年限增加的变化幅度(图1)<sup>[10]</sup>,总趋势是迎茬和重茬都导致大豆单产下降,但重茬减产幅度要大于迎茬,并且随着重茬种植时间延长,减产幅度逐渐增加。但是最近的研究发现,重茬大豆产量并非随着重茬年限增加持续恶化,如Li等<sup>[11]</sup>研究发现连作第9年的大豆产量显著高于连作第3年,表明连作达到一定年限,产量下降到一定程度就基本上维持在一定水平,甚至有升高趋势,而造成这种缓解现象的原因可能与土壤微生物的作用有关。

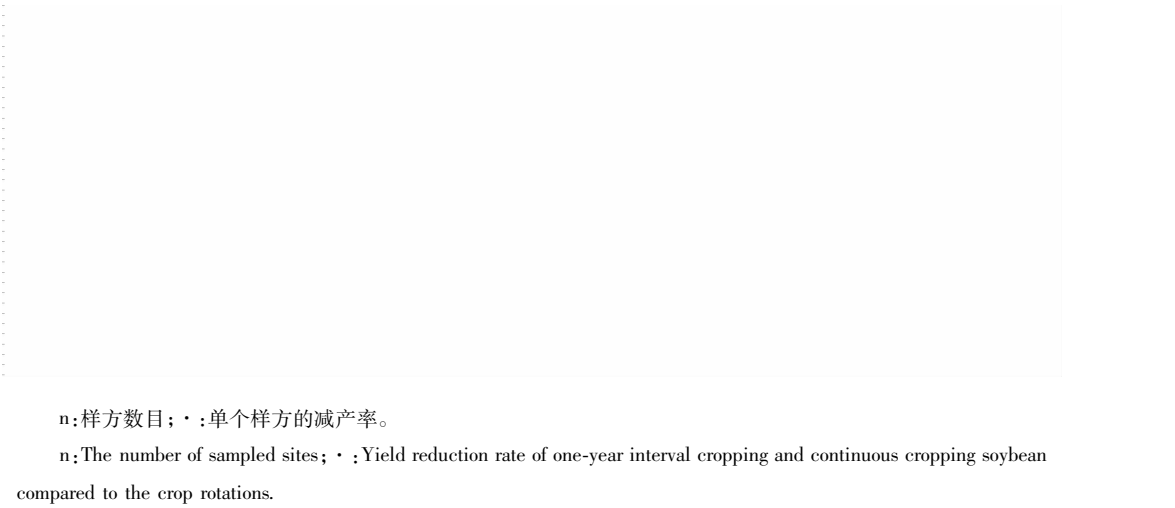


图1 重茬大豆产量变化情况  
Fig.1 Variation of soybean yield after continuous cropping

1.3 品质

蛋白质与脂肪是大豆籽粒中的主要化学成分,同时也是大豆化学品质的重要评价指标。研究发现,大豆重茬种植年限超过3年,蛋白质含量有所增加,而脂肪含量表现出降低趋势,但是短期重迎茬种植对蛋白质和脂肪含量无影响<sup>[12]</sup>。大豆异黄酮和脂肪酸属于次级代谢物,具有重要的药用价值,同样也可以作为大豆品质重要评价指标<sup>[13-14]</sup>。研究证明,1~2年大豆重茬土壤接种摩西管柄囊霉(*Funnelformis mosseae*)能够提高大豆异黄酮含量,降低脂肪酸含量,但是对脂肪酸种类影响不大<sup>[15]</sup>。此外,大豆重迎茬种植对其商品品质也有较大影响,据统计,与正茬相比,重茬3年大豆秕粒率、病粒率和虫食率分别增加了1.8%、4.1%和1.8%,而完整粒率降低了5.9%<sup>[4]</sup>。由此可见,大豆重迎茬种植严重影响大豆正常的生长发育并降低其产量和品质。

2 重迎茬种植大豆对土壤环境的影响

土壤环境状况与作物生产力之间存在密切联系,重迎茬种植大豆对土壤环境的影响主要表现在土壤肥力及土壤病虫害两个方面。

2.1 土壤肥力

土壤肥力是土壤基本属性和本质特征,并且是反映土壤肥沃性的重要指标。大豆重迎茬种植能够削弱土壤肥力,恶化土壤环境条件。研究表明,重茬大豆的土壤pH、含水量、有机质、腐殖质、>5mm机械稳定性团聚体数量和水稳性团聚体数量均明显降低<sup>[16-20]</sup>。有关重茬大豆土壤pH降低的原因,一种观点认为重茬种植导致根系分泌物和土壤微生物分泌的有机酸增多<sup>[21]</sup>,另一种观点则认为可能是大豆从空气中固定氮素,降低了无机氮的吸收量,导致根系吸收的阳离子总量超过了阴离子总量,最终使土壤中的H<sup>+</sup>浓度增加,从而造成了根际

土壤酸化<sup>[22]</sup>。土壤 pH 与土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶和磷酸酶的酶活性之间存在显著正相关关系<sup>[23]</sup>。大豆重茬种植使土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和转化酶活性逐渐降低,以重茬第 2 年最为明显,重茬 4~5 年时,pH 值和酶活性表现出回升趋势<sup>[24]</sup>。除此之外,土壤中养分的有效性也容易受到土壤 pH 的影响。重茬种植能显著降低大豆对磷、钾的吸收,但是对氮素的吸收影响不大,并且随着重茬年限增加,土壤中全氮和碱解氮含量有所增加,速效氮、磷、钾以及微量元素硼、钼、锌含量逐渐降低<sup>[25]</sup>。贾新民等<sup>[26]</sup>研究发现,土壤多糖含量随着种植年限的延长而表现出明显降低趋势,主要是微生物性多糖不断增加,植物性多糖逐渐减少,而且土壤多糖含量与速效氮、有机质含量、蔗糖酶活性以及土壤细菌数量有显著正相关关系,与土壤真菌数目呈显著负相关关系。土壤肥力维持与土壤微生物有关,并且陆地生物地球化学循环过程都有土壤微生物参与<sup>[27]</sup>。研究表明,土壤 pH 是驱动土壤微生物群落发生变化的主要因子,而大豆重茬种植导致土壤 pH 下降,土壤肥力降低,加上根系产生的化感作用,进而刺激了病原菌的生长,加重了植物病虫害的发生<sup>[4,21,28]</sup>。

2.2 病虫害

2.2.1 重迎茬条件下土壤病虫害发生情况 重迎茬大豆的根部病虫害主要有大豆根腐病(*Fusarium Rhizoctonia Pythium*),胞囊线虫病(*Heterodera lycines*)和根潜蝇(*Ophimyia shibatsuji*)等,均属于土传病害<sup>[4]</sup>。大豆重迎茬种植能够加重病虫害的发生,其中重迎茬大豆的根腐病、灰斑病和虫食程度与正茬相比主要表现为:重茬>迎茬>正茬<sup>[29]</sup>。陈立杰等<sup>[30]</sup>研究发现,在大豆整个生长期,重茬大豆胞囊线虫病害都要比轮作严重,主要表现在饱满胞囊总量、不饱满胞囊总量的增加。对于大豆根腐病,刘金波等<sup>[31]</sup>研究发现,17 年重茬大豆根腐病发病程度与轮作之间无显著差异,但是生长发育状况稍差于轮作。而大豆根潜蝇与根腐病之间有着极显著的正相关关系,根潜蝇的危害能够加重根腐病的发生<sup>[4]</sup>。

2.2.2 不同重迎茬年限对病虫害的影响 不同茬口病虫害发病程度有明显不同,并且在不同重茬种植年限之间也有很大区别。陈申宽等<sup>[32]</sup>研究发现,大豆重茬种植增加了根腐病、褐斑病、灰斑病、霜霉病和菌核病病情指数,而且重茬前 2 年大豆根潜蝇

被害率和食心虫食率逐年增加。据统计,与正茬相比,重茬一年的病情指数增加了 58%,重茬二年较迎茬病情指数增加了 22%<sup>[4]</sup>。然而,大豆重茬种植并不是始终加重病虫害的发生,长期的大豆重茬种植能够降低病虫害的发病程度。Liu 等<sup>[33]</sup>在对大豆长期重茬对土壤真菌群落结构的影响中发现,长期重茬大豆的病情指数显著低于二年重茬大豆,与轮作大豆之间无差异。魏巍等<sup>[34]</sup>研究也发现,20 年长期重茬种植的大豆根际土壤中根腐病原菌镰孢菌(*Fusarium oxysporum*)种群密度显著低于3 年重茬。此外,土壤的健康状况还受到土壤生物群落的影响。土壤线虫作为土壤生态系统中的重要组成部分,对于维持土壤生态系统稳定、促进物质循环与能量流动具有重要意义,因而土壤线虫群落结构被认为是监测土壤健康状况的重要生物指标<sup>[35]</sup>。按照食性的不同,线虫群落可分为植物寄生线虫、食细菌线虫、食真菌线虫、捕食性和杂食性线虫。大豆胞囊线虫(*Heterodera glycines*)属于植物寄生线虫中的胞囊线虫属(*Heterodera*),短期重茬能够增加大豆胞囊线虫的数量,然而随着重茬年限增加,土壤中胞囊线虫的种群密度降低<sup>[36]</sup>。王进闯等<sup>[37]</sup>研究发现,大豆重茬 2~3 年根际土壤线虫群落丰度下降最明显,到重茬 6~9 年有一定恢复,但是未能完全恢复。潘凤娟等<sup>[38]</sup>研究结果表明长期大豆重茬种植会改变了土壤线虫群落结构,而且随着连作年限延长,土壤线虫属多样性降低,食物网结构有向成熟稳定方向过度的趋势。因此,长期的大豆重茬种植对于病虫害改善的生理机制值得进一步深入研究。

3 土壤与作物的相互作用

3.1 自毒作用

化感作用指植物(包括微生物)代谢分泌物对环境其它植物或微生物产生的促进或者抑制作用<sup>[39]</sup>。植物通过挥发、淋溶、花粉传播、根系分泌物和残茬腐解等途径将存在于植物各个部分的化感物质释放到环境中。Guenzi 等<sup>[40]</sup>研究认为植物根系分泌和植物残茬分解产生的毒素是导致作物重茬障碍的重要因子。

重迎茬大豆根际土壤和地上部淋洗液中包含了许多化感物质,使大豆产生自毒作用,并且组分浓度越高抑制作用也就越强<sup>[4,10,41]</sup>。根系分泌物中抑制植物生长的化感物质主要是酚类化合物,但是不同品种间自毒物质的种类有所不同,研究发现,

重迎茬豌豆中的苯甲酸、水杨酸和丙二酸,在低浓度下就能够显著抑制植株生长,而重迎茬蚕豆中主要的分泌物苯甲酸、乳酸和对羟基苯乙酸,对根系生长的抑制率可达到 80% 以上<sup>[42-43]</sup>。李彩凤等<sup>[44]</sup>研究发现甜菜根系分泌物对大豆产生化感作用,能够延长发芽时间和抑制植株生长,降低净光合速率和硝酸还原酶活性,并鉴定出其中的主要化感物质是 2,6-二叔丁对甲酚和邻苯二甲酸。Patterson<sup>[45]</sup>研究发现,在  $1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度下,咖啡酸、肉桂酸、香豆酸、阿魏酸、五倍子酸、香草酸能够显著抑制大豆干物质产量、叶片净同化速率、株高和叶片伸展等。大豆的根系分泌物中检测到的主要有酸、醇、酯等有机化合物 8 类 124 种,其中在能被二氯甲烷提取的种类中,主要以烃类为主,而且不同茬口的根系分泌物种类有所不同,重迎茬种植增加了土壤中蛋白质、糖、氨基酸、酚酸、醛等多种物质的含量,主要表现为 2 年重茬 > 1 年重茬 > 迎茬 > 正茬<sup>[46]</sup>。李业成等<sup>[47]</sup>发现,正茬和重茬大豆根系分泌物均能抑制大豆萌发和初生根生长,而且检测到仅存在于重茬大豆根系分泌物中相对含量较高的物质,主要有十一醇、二十烷、2-乙基-1-十二醇、甲基-丁二酸、7,9-二甲基-十六烷和(E)-2-丁烯酸。迎茬大豆根系分泌中主要是有机酸、酯、苯和烃类等物质,化感物质种类远少于重茬大豆,其中十六烯酸、十八烷酸、8-十八烯酸、(Z)-9-十八烯酸、11-十八碳烯酸、(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸和 10,13-十八碳二烯酸可能为化感物质<sup>[48]</sup>。鞠会艳等<sup>[49]</sup>发现,低浓度重茬大豆根系分泌物能够促进根腐病病原菌半裸镰孢菌(*Fusarium semitectum*)、粉红粘帚菌(*Gliocladium roseum*)和尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)的生长。杜英军等<sup>[50]</sup>研究表明重茬大豆根系分泌物和组织水浸液对于下茬大豆幼苗的根系发育有明显抑制作用,并且通过液相色谱法从根系分泌物和植株水浸液中分离出香草酸、香草醛和对羟基苯甲酸等酚酸类物质,而这些酚酸物质与大豆重茬胁迫有直接关系。大豆残茬中也存在具有自毒作用的化感物质,其中以苗期大豆根浸液中提取的酸性组分抑制作用最强<sup>[4]</sup>。研究还发现大豆残茬腐解液和营养液残液可以明显抑制大豆种子萌发和植株生长发育,并且在连作大豆土壤中增加大豆残茬量可以造成大豆大幅度减产<sup>[51-52]</sup>。由此可见,根系分泌物和大豆残茬腐解物与重茬胁迫关系密切,了解重迎茬大豆产生的化感物质,对于改善重茬生长障碍具有重要意义。

3.2 土壤微生物

3.2.1 微生物多样性 土壤是一个复杂、多元化的生态环境,土壤生态系统的服务和功能与土壤微生物的群落息息相关。何志鸿等<sup>[53]</sup>研究发现,在重茬 2 年灭菌土壤种植的大豆在产量与生长发育方面和正茬灭菌土种植的大豆相同,而重茬 2 年未灭菌处理,明显低于其它处理,由此证明了土壤微生物是造成重迎茬减产的主要原因。土壤微生物多样性是维持土壤健康的关键因素,大豆重茬种植与正茬相比显著降低了土壤细菌和真菌群落的多样性,重茬大豆根际微生物总数明显低于正茬,细菌总数在整个生育期具有绝对优势,并且随着大豆重茬年限的延长,土壤微生物群落由高肥的“细菌型”逐渐转化为低肥的“真菌型”土壤<sup>[4,33,54-56]</sup>。陈雪丽等<sup>[57]</sup>研究发现,大豆重茬种植 7 年以上的土壤细菌多样性和群落结构组成均明显低于正茬和短期重茬,而对于真菌群落而言,重茬 2 年和 4 年的真菌群落多样性更高,而长期重茬的真菌群落组成与正茬相似度较高。然而,土壤微生物多样性在大豆不同生长期对于耕作方式的响应有明显不同。在大豆收获时期,正茬和迎茬处理的土壤微生物多样性要显著高于重茬,但是在结荚时期,重迎茬种植要显著高于正茬<sup>[58]</sup>。

3.2.2 微生物群落组成 不同茬口大豆土壤中所包含的真菌种类有所不同,而重茬和正茬大豆土壤中的优势菌群则主要为青霉菌(*Penicillium*)和镰刀菌(*Fusarium*),但是重茬土壤中的真菌数量高于正茬,并且从重茬土壤中分离出的紫青霉菌株(*Penicillium purpurogenum*)能够通过分泌红色青霉毒素强烈抑制大豆生长,这也是重茬大豆减产的主要原因<sup>[59]</sup>。重茬大豆残根或凋落物中某些物质,同样也是通过刺激土壤紫青霉菌数量成倍的增加,从而分泌更多紫青霉毒素导致土壤微环境恶化,造成大豆减产。对于细菌群落而言,大豆短期与长期重茬种植的土壤细菌群中前 10 种优势菌群的组成相同,但是长期重茬种植后的土壤中优势菌群结构变化较小,而土壤中芽孢杆菌属(*Bacillus*)、链霉菌属(*Streptomyces*)、溶杆菌属(*Lysobacter*)、土微菌属(*Pedomicrobium*)、慢性根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)和硝化菌属(*Nitrospira*)所占比例升高,并且氨氧化古菌和氨氧化细菌的群落结构和多样性都受到了显著影响<sup>[60-61]</sup>。

由于病原菌和大部分腐生微生物群落之间复杂的相互联系,土壤中植物病原菌的生长和对植物

的侵染过程会受到抑制,从而有利于抑病土的产生<sup>[62]</sup>。抑病土一般是指存在植物病原菌,易感寄主植物和气候条件允许疾病发展的条件下,植物发病率或严重程度通常保持在较低水平的土壤<sup>[63]</sup>。研究发现,相较于正茬种植,大豆长期重茬种植的土壤中具有更强的大豆胞囊线虫(*Heterodera glycines*)抑制成分,而该成分可能与拟青霉菌属(*Paecilomyces* spp.)、轮枝菌属(*Verticillium* spp.)、链霉菌(*Streptomyces* sp.)、根瘤菌(*Rhizobium* sp.)、哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、厚垣普奇尼亚菌(*Pochonia chlamydosporia*)、淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)、荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescen*)、洛斯里被毛孢(*Hirsutella rhossiliensis*)、明尼苏达被毛孢(*Hirsutella minnesotensis*)和镰孢菌属(*Fusarium* spp.)密切相关<sup>[36,64-66]</sup>。Hamid 等<sup>[67]</sup>基于高通量测序技术对大豆抑病土壤微生物展开研究,发现相较于短期重茬种植(≤5 年),抑制胞囊线虫的假单胞菌属(*Pseudomonas*),紫霉属(*Purpureocillium*)和 *Pochonia* 在长期重茬(6~38 年)土壤中具有更高的物种丰度。进一步证实了长期连作条件下,大豆能够通过改变土壤微生物群落的结构和功能组成抑制病原菌侵染。Liu 等<sup>[33]</sup>通过研究也发现,长期大豆重茬种植能够对病原真菌和有益真菌产生选择性胁迫,使真菌群落结构趋于植物健康发展。由此可见,土壤微生物群落多样性与结构组成在大豆重茬种植中的作用不容忽视,明确长期重迎茬大豆土壤有益菌种类和功能对于作物健康生长尤为重要。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

大豆重迎茬种植能够抑制植株生长发育,严重影响作物产量和品质。这种生长障碍产生的原因与重迎茬种植导致的土壤环境恶化以及土壤与作物间的相互作用有关。大豆重迎茬种植严重削弱土壤肥力,主要表现为土壤 pH、有机质、土壤速效养分以及土壤酶活性的降低;加重了大豆根腐病、胞囊线虫病和潜叶蝇等土传病虫害的发生,造成根系自毒物质的大量累积,主要是酚酸类化合物的增多;使土壤微生物群落发生明显改变,由高肥的“细菌型”逐渐转化为低肥的“真菌型”土壤。长期的重茬种植,有利于抑病土的产生,抑制相关病原菌的生长,使土壤环境以及植株的生长发育有明显改善。然而,关于抑病土的产生及其微生物群落的变化特征,还有待于进一步的研究。

### 4.2 展望

土地资源对于中国农业发展尤为重要,目前中国耕地状况不容乐观,土壤肥力下降等问题制约农业生产,如何维持土壤生态健康,保持较高土壤-作物系统生产力一直是关注的重点。由于土壤环境复杂多变,长期大豆连作障碍机理研究并未取得实质性的突破进展。近些年来,随着科学技术的不断发展,宏基因组、转录组、蛋白组和代谢组测序等一大批全新研究手段应用于土壤生态学领域,将有助于突破传统研究方法的局限性。根系-土壤-微生物之间的相互关系对于地上植物健康生长至关重要,目前对于这方面的研究仍旧处于发展初始阶段,相关理论成果大部分都来自于模式植物,然而最近几年对于可持续发展农业的迫切需求使相关作物根际环境的研究备受关注。因此,大豆重迎茬研究在未来应该注重以下几个方面的发展:(1)大豆根系的信号物质和关键的植物调控基因是什么,它是如何诱导微生物群落发生变化的;(2)目前已鉴定出了多种根系化感物质,这些物质之间是否存在交互作用,对于土壤病原菌又会产生怎样的影响;(3)抑病土中优势菌群种类和功能鉴定,加强微生物种群功能属性研究,开发出综合性微生物群落资源。基于此,利用分子生物学技术综合分析重迎茬大豆根际微生物组、根系分泌物和根系之间功能的相互作用,进一步揭示大豆连作障碍的深层机理,从而促进大豆产业的可持续发展。

### 参考文献

[1] 薛庆喜. 中国及东北三省 30 年大豆种植面积、总产、单产变化分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 102-106. (Xue Q X. Analysis on the change of 30 year's soybean areas, production and yield in China and northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(35): 102-106. )

[2] 王飞, 李世贵, 徐凤花, 等. 连作障碍发生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 6-12. (Wang F, Li S G, Xu F H, et al. The research progress on mechanism of continuous cropping obstacle[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013(5): 6-12. )

[3] 张怀寿. 黑龙江省大豆重迎茬现状及综合栽培技术[J]. 农业工程技术, 2017(9): 56. (Zhang H Q. Present situation and comprehensive cultivation techniques of soybean in Heilongjiang province [J]. Agricultural Engineering Technology, 2017(9): 56. )

[4] 许艳丽, 韩晓增. 大豆重迎茬研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995. (Xu Y L, Han X Z. Research on continuous cropping of soybean[M]. Harbin: Harbin University of Engineering Press, 1995. )

[5] 许艳丽, 刘晓冰, 韩晓增, 等. 大豆连作对生长发育动态及产量的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 32(S1): 64-68. (Xu Y L, Liu X B, Han X Z, et al. Effect of continuous cropping on yield and growth development of soybean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(S1): 64-68. )

[6] 郑桂萍, 李国兰, 张红艳, 等. 连作大豆根冠比增大原因研究[J]. 耕作与栽培, 1997(5): 17-19. (Zheng G P, Li G L, Zhang H Y, et al. Study on the causes of increasing root-shoot ratio of soybean under continuous cropping[J]. Tillage and Cultivation, 1997(5): 17-19. )

[7] 王晶英, 郑桂萍, 张红燕, 等. 连作大豆根冠比增大原因的研究[J]. 大豆科学, 1995, 16(2): 136-142. (Wang J Y, Zheng G P, Zhang H Y, et al. Study on the reason of root-shoot ratio increasing of soybean on continuous cropping[J]. Soybean Science, 1995, 16(2): 136-142. )

[8] 何志鸿, 刘忠堂, 许艳丽, 等. 大豆重迎茬减产的原因及农艺对策研究 I. 重迎茬对大豆产量与品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2003(3): 1-4. (He Z H, Liu Z T, Xu Y L, et al. Study in the reason reducing production of soybeans cultured continuously and the way to get more output I. yield and quality[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2003(3): 1-4. )

[9] 董丽华, 胡立成, 李铭丰, 等. 重迎茬对大豆根部生育及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 1999(4): 32-34. (Dong L H, Hu L C, Li M F, et al. Effects of continuous cropping on root growth and yield of soybean[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1999(4): 32-34. )

[10] 黑龙江省农业科学院, 中国科学院黑龙江农业现代化研究所, 黑龙江省科学技术厅. 重迎茬影响大豆生产的机理与技术对策研究专题研究报告[R]. 2000. (Heilongjiang Academy of Agricultural Science, Heilongjiang Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, Heilongjiang Science and Technology Department. Special research about mechanisms and technological strategies of continuous cropping on soybean production[R]. 2000. )

[11] Li C G, Li X M, Kong W D, et al. Effect of monoculture soybean on soil microbial community in the northeast China[J]. Plant and Soil, 2010, 330(1-2): 423-433.

[12] 杨庆凯, 宁海龙, 周育中, 等. 不同生态条件重迎茬对大豆化学品质的影响[J]. 大豆科学, 2001, 20(3): 187-190. (Yang Q K, Ning H L, Zhou Y Z, et al. Effects of soybean cropping of continuous and alternating with another crop on chemical qualities in different ecological condition[J]. Soybean Science, 2001, 20(3): 187-190. )

[13] 梁伟, 李洁. 大豆有效成分的药用价值研究进展[J]. 临床医药实践, 2018, 27(11): 848-851. (Liang W, Li J. Advances in research on medicinal value of active components in soybean[J]. Proceeding of Clinical Medicine, 2018, 27(11): 848-851. )

[14] 牛红红, 孟凡磊, 张国辉, 等. 大豆脂肪酸含量的快速测定[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 282-285. (Niu H H, Meng F L, Zhang G H, et al. Fast analysis on fatty acids of soybean[J]. The Food Industry, 2017, 38(6): 282-285. )

[15] 崔佳琦, 魏丽娜, 蔡柏岩. 接种摩西管柄囊霉 (*Funneliformis mosseae*) 对连作大豆异黄酮及脂肪酸含量的影响[J]. 农学学报, 2015, 5(4): 31-35. (Cui J Q, Wei L N, Cai B Y. Effect of inoculated *Funneliformis mosseae* on the content of isoflavone and fatty acid in the continuous cropping of soybean[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(4): 31-35. )

[16] 董炳友, 高淑英, 吕正文. 不同施肥措施对连作大豆的产量及土壤 pH 值得影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2002, 14(4): 19-21. (Dong B Y, Gao S Y, Lyu Z W. Effect of different fertilizing on soybean yield and soil pH value in continuous cropping[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2002, 14(4): 19-21. )

[17] 孙磊. 不同连作年限对大豆根际土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 266-269. (Sun L. Effect of soybean continuous cropping on the rhizosphere soil nutrition[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(12): 266-269. )

[18] 王笃超, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 258-270. (Wang D C, Wu J G, Li J M. Effects of different organic material on soil nutrient content and biological properties of continuous cropping of soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 258-270. )

[19] 王莉, 吴景贵, 张志莹, 等. 大豆重茬对黑土团聚体及腐殖质结合形态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 238-242. (Wang L, Wu J G, Zhang Z Y, et al. Effects of soybean continuous cropping on the aggregation and combined forms of humus in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 238-242. )

[20] 计钟程, 许文芝, 赵立臣. 连作大豆对土壤水分和养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(3-4): 89-92. (Ji Z C, Xu W Z, Zhao L C. Effect of continuous soybean on moisture and nutrients of soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(3-4): 89-92. )

[21] 邹永久, 韩丽梅, 付慧兰, 等. 大豆连作土壤障碍因素研究 I. 连作对土壤腐殖质组分性质的影响[J]. 大豆科学, 1996, 15(3): 235-242. (Zou Y J, Han L M, Fu H L, et al. Studies on soil obstructive factors soybean (*Glycine max*) continuous cropping[J]. Soybean Science, 1996, 15(3): 235-242. )

[22] Swart P H D, Diest A V. The rock-phosphate solubilizing capacity of *Pueraria javanica* as affected by soil pH, superphosphate priming effect and symbiotic N<sub>2</sub> fixation[J]. Plant and Soil, 1987, 100(1/3): 135-147.

[23] 付慧兰, 邹永久, 杨振明, 等. 大豆连作土壤 pH 与土壤酶活性[J]. 大豆科学, 1997, 16(2): 156-161. (Fu H L, Zou Y J, Yang Z M, et al. Soil pH of continuous cropping soybean and soil enzyme activity[J]. Soybean Science, 1997, 16(2): 156-161. )

[24] 傅慧兰, 杨振明, 邹永久, 等. 大豆连作对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(4): 374-377. (Fu H L, Yang Z M, Zou Y J, et al. Influence of successive cropping of soybean on soil enzyme activity[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(4): 374-377. )

[25] 陈申宽, 齐广, 武迎红, 等. 大豆连作对土壤养分及其产量的影响[J]. 哲里木畜牧学院学报, 1999, 9(3): 31-40. (Chen S

K, Qi G, Wu Y H, et al. Effect of continuous soybean cropping on soil nutrient and soybean yield[J]. Journal of Zhelimu Animal Husbandry College, 1999, 9(3): 31-40. )

[26] 贾新民, 殷奎德, 隋文志. 大豆连作条件下土壤多糖研究初报[J]. 大豆科学, 1996, 15(2): 170-174. (Jia X M, Yin K D, Sui W Z. Study on soil polysaccharides in soybean continuous cropping field[J]. Soybean Science, 1996, 15(2): 170-174. )

[27] Bardgett R D, Van d P W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. Nature, 2014, 515(7528): 505-511.

[28] Rousk J, BååTh E, Brookes P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil[J]. The ISME Journal, 2010, 4(10):1340-1351.

[29] 陈立杰, 朱艳, 刘彬, 等. 连作和轮作对大豆孢囊线虫群体数量及土壤线虫群落结构的影响[J]. 植物保护学报, 2007, 34(4): 347-352. (Chen L J, Zhu Y, Liu B, et al. Influence of continuous cropping and rotation on soybean cyst nematode and soil nematode community structure[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2007, 34(4): 347-352. )

[30] 陈立杰, 刘晓杰, 段玉玺, 等. 轮作和连作大豆孢囊线虫孢囊上真菌定殖动态[J]. 大豆科学, 2009, 28(2): 266-270. (Chen L J, Liu X J, Duan Y X, et al. Dynamics of fungal colonization on cyst in rotation and continuous cropping of soybean[J]. Soybean Science, 2009, 28(2): 266-270. )

[31] 刘金波, 许艳丽, 李春杰, 等. 大豆连作土壤盆栽大豆根腐病及生长发育状况[J]. 大豆科学, 2008, 27(5): 806-810. (Liu J B, Xu Y L, Li C J, et al. Effect of long term soybean monoculture on soybean root rot and soybean growth and development in pot experiment[J]. Soybean Science, 2008, 27(5): 806-810. )

[32] 陈申宽, 黄复民, 郭桂清, 等. 大豆连作土壤肥力变化与有害生物发生的关系[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 373-376. (Chen S K, Huang F M, Guo G Q, et al. The relation between soil fertility caused by continuous soybean and the harmful livings [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 373-376. )

[33] Liu H, Pan F, Han X, et al. Response of soil fungal community structure to long-term continuous soybean cropping[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9:3316.

[34] 魏巍, 许艳丽, 朱琳, 等. 长期连作对大豆根际土壤镰孢菌种群的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 497-504. (Wei W, Xu Y L, Zhu L, et al. Impact of long-term continuous cropping on the *Fusarium* population in soybean rhizosphere[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 497-504. )

[35] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1999, 14(6):224-228.

[36] Chen S Y. Suppression of *Heterodera glycines* in soils from fields with long-term soybean monoculture[J]. Biocontrol Science and Technology, 2007, 17(2): 125-134.

[37] 王进闯, 王敬国. 大豆连作土壤线虫群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1022-1031. (Wang J C, Wang J G. Effects of continuous soybean monoculture on soil nematode community [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 1022-1031. )

[38] 潘凤娟, 韩晓增, 邹文秀. 春大豆长期连作对土壤线虫群落结构和食物网的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(4): 606-613. (Pan F J, Han X Z, Zou W X. Effect of spring soybean long-term monoculture on soil nematode community structure and food web [J]. Soybean Science, 2017, 36(4): 606-613. )

[39] Scavo A, Restuccia A, Mauromicale G. Allelopathy: Principles and basic aspects for agroeco system control[M]//Sustainable Agriculture Review 28, 2018: 47-101.

[40] Guenzi W D, McCalla T M. Phytotoxic substances extracted from soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(2): 214-216.

[41] Asaduzzaman M, Asao T. Autotoxicity in beans and their allelochemicals[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134(2): 26-31.

[42] Tang C S, Young C C. Collection and identification of allelopathic compounds from the undisturbed root system of bigalta limpo-grass (*Hemarthria altissima*) [J]. Plant Physiology, 1982, 69(1): 155-160.

[43] Asaduzzaman M, Asao T. Autotoxicity in beans and their allelochemicals[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134: 26-31.

[44] 李彩凤, 陈明, 马凤鸣, 等. 甜菜根系分泌物对大豆化感作用研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 8(47): 21-30. (Li C F, Chen M, Ma F M, et al. Study on allelopathy of sugar beet root exudates on soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 8(47): 21-30.

[45] Patterson D T. Effects of allelopathic chemicals on growth and physiological responses of soybean (*Glycine max*) [J]. Weed Science, 1981, 29(1): 53-59.

[46] 何志鸿, 刘忠堂, 许艳丽, 等. 大豆重迎茬减产的原因及农艺对策研究—重迎茬大豆的根际土壤有机化合物[J]. 黑龙江农业科学, 2003(5):1-5. (He Z H, Liu Z T, Xu Y L, et al. Study on the reason reducing production of soybeans planted continuously and the way to get more output-organic compound of rhizosphere soil[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2003(5): 1-5. )

[47] 李业成, 马凤鸣, 吴蕾, 等. 正茬与连作大豆根系分泌物差异及对大豆幼苗生长的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 1-6. (Li Y C, Ma F M, Wu L, et al. Different effect of rotation and continuous soybean root secretion on seedling growth of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6): 1-6.

[48] 韩丽梅, 王树起, 肖丽华. 重迎茬大豆根区土壤有机化合物的 GC/MS 分析[J]. 吉林农业科学, 2005, 30(4): 6-8. (Han L M, Wang S Q, Xiao L H. Analysis of organic compounds in continuous and alternate cropping soil around rhizosphere of soybean by GC/MS[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2005, 30(4): 6-8. )

[49] 鞠会艳, 韩丽梅, 王树起, 等. 连作大豆根分泌物对根腐病原菌的化感作用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 723-727. (Ju H Y, Han L M, Wang S Q, et al. Allelopathic effect of root exudates on pathogenic fungi of root rot in continuous cropping soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 723-727. )

723-727. )

[50] 杜英军, 靳月华. 连作大豆植株化感作用的模拟研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 209-212. ( Du Y J, Jin Y H. Simulations of allelopathy in continuous cropping of soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(2): 209-212. )

[51] 王树起, 韩丽梅, 杨振明, 等. 大豆根茬腐解液和营养液残夜对大豆生长发育的自感效应[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(3): 43-47. ( Wang S Q, Han L M, Yang Z M, et al. Effect of decomposed liquids from soybean stubs and remnants of nutrient solution on soybean growth[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2000, 22(3): 43-47. )

[52] 王树起, 韩丽梅, 杨振明, 等. 大豆根茬腐解液和营养液残夜对大豆生长发育的自感效应[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(3): 43-47. ( Wang S Q, Han L M, Yang Z M, et al. Effect of decomposed liquids from soybean stubs and remnants of nutrient solution on soybean growth[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2000, 22(3): 43-47. )

[53] 何志鸿, 刘忠堂, 许艳丽, 等. 大豆重迎茬减产的原因及农艺对策研究-重迎茬大豆减产的主要原因[J]. 黑龙江农业科学, 2003(2): 1-4. ( He Z H, Liu Z T, Xu Y L, et al. Study on the reason reducing production of soybeans planted continuously and the way to get more output-The reason to reduce yield [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2003(2): 1-4. )

[54] Liu J J, Yu Z H, Yao Q, et al. Distinct soil bacterial communities in response to the cropping system in a Mollisol of northeast China [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 119: 407-416.

[55] Liu J J, Yao Q, Li Y S, et al. Continuous cropping of soybean alters the bulk and rhizospheric soil fungal communities in a Mollisol of northeast PR China[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(14): 1725-1738.

[56] 王进闯. 大豆连作对根际土壤生物群落的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ( Wang J C. The impact of continuous soybean monoculture on soil communities in the rhizosphere [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. )

[57] 陈雪丽, 王玉峰, 李伟群, 等. 黑土区连作大豆根际微生物群落结构的动态变化[J]. 大豆科学, 2018, 37(5): 748-755. ( Chen X L, Wang Y F, Li W Q, et al. Dynamic evolution of microbial community in the rhizosphere of continuous cropping of soybean in black soil [J]. Soybean Science, 2018, 37(5): 748-755. )

[58] 李春格, 李晓鸣, 王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1144-1150. ( Li C G, Li X M, Wang J G. Effect of soybean continuous cropping

on bulk and rhizosphere soil microbial community function [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1144-1150. )

[59] 胡江春. 重茬大豆土壤紫青霉菌毒素危害及其防治的生物技术研究[D]. 沈阳: 沈阳应用生态所, 1998. ( Hu J C. Deleterious effects of phytotoxins produced by *Penicillium Purpurogenum* on soybean continuous cropping and biological control technology [D]. Shenyang: Institute Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 1998. )

[60] 朱琳, 曾椿淋, 李雨春, 等. 基于高通量测序的大豆连作土壤细菌群落多样性分析[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 419-424. ( Zhu L, Zeng C L, Li Y C, et al. The characteristic of bacterial community diversity in soybean field with continuous cropping based on the high-throughput sequencing[J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 419-424. )

[61] 王晋莉. 大豆连作条件下的根际细菌与氨氧化微生物群落特征及其影响因素[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ( Wang J L. Rhizospheric bacterial and ammonia-oxidizer communities under continuous monoculture of soybean crop [D] Beijing: China Agricultural University, 2014. )

[62] Alabouvette C. Fusarium wilt suppressive soils: An example of disease-suppressive soils[J]. Australasian Plant Pathology, 1999, 28(1): 57-64.

[63] Baker K F, Cook R J. Biological control of plant pathogens[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1974: 433.

[64] Zhu Y, Shi F, Tian J, et al. Effect of soybean monoculture on the bacterial communities associated with cysts of *Heterodera glycines* [J]. Journal of Nematology, 2013, 45(3): 228-235.

[65] 孙玉秋, 许艳丽, 李春杰, 等. 作物轮作系统对大豆胞囊线虫二龄幼虫寄生真菌的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 277-280. ( Sun Y Q, Xu Y L, Li C J, et al. Effects of crop rotation system on the parasitic fungi associated with soybean cyst nematode second stage juvenile [J]. Soybean Science, 2011, 30(2): 277-280. )

[66] Wei W, Xu Y L, Li S X, et al. Developing suppressive soil for root diseases of soybean with continuous long-term cropping of soybean in black soil of northeast China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science, 2014, 65(3): 279-285.

[67] Hamid M I, Hussain M, Wu Y, et al. Successive soybean-monoculture cropping assembles rhizosphere microbial communities for the soil suppression of soybean cyst nematode[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2017, 93(1).