



甫文疆,赵芸晨,王文丽,闫治斌,王治江,陈叶,陈广泉. 制种玉米连作对土壤氮组分含量及根腐病发病的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(02):23-35.  
FU Wenjiang, ZHAO Yunchen, WANG Wenli, YAN Zhibin, WANG Zhijiang, CHEN Ye, CHEN Guangquan. Effects of continuous corn seed production on the soil nitrogen distribution and incidence of root rot[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(02): 23-35.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.03

## 制种玉米连作对土壤氮组分含量及根腐病发病的影响

甫文疆<sup>1,2</sup> 赵芸晨<sup>1\*</sup> 王文丽<sup>1</sup> 闫治斌<sup>3</sup> 王治江<sup>1</sup> 陈叶<sup>1</sup> 陈广泉<sup>1</sup>

(1. 河西学院 农业与生态工程学院, 甘肃 张掖 734000;

2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 甘肃省敦煌种业集团股份有限公司研究院, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要** 为探究制种玉米连作根内微生物、土壤氮素与根腐病发病率间的相关关系,采用大田试验及高通量测序技术,以不同连作年限(5、10、15、20、25年)制种玉米田为研究对象,未种植玉米的地块为对照(CK),调查玉米根腐病发病率,测定玉米根部内生菌与土壤不同形态氮素含量。结果表明,与对照(CK)比较,连作25年的地块土壤全氮含量显著降低,至0.72 g/kg;铵态氮含量显著升高,至72.97 mg/kg;而硝态氮与水解氮含量呈现先增加后下降趋势。5个连作地块的酸解氮、水解氮和铵态氮含量均显著增加,氨态氮含量显著下降;除连作5年外,其余4个连作地块的氨基酸态氮含量显著增加,全氮、非酸解氮和氨基糖态氮含量显著下降( $P<0.05$ )。连作显著降低根内微生物多样性与丰富度( $P<0.05$ )。在属水平,制种玉米根内优势细菌13个属,其中假单胞菌属(*Pseudomonas*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、地杆菌属(*Pedobacter*)与泛菌属(*Pantoea*)丰度最高;优势真菌10个属,其中隔孢伏革属(*Peniophora*)、曲霉属(*Aspergillus*)、裂褶菌属(*Schizophyllum*)与单孢平霉属(*Phialemoniopsis*)丰度最高。连作对制种玉米根内细菌与真菌属的类型变化无显著影响,但连作改变了根内细菌与真菌属的相对丰度。此外,制种玉米根腐病发病率均显著上升,根腐病发病率与土壤酸解氮、氨基酸态氮、水解氮、铵态氮及硝态氮含量均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与土壤全氮、非酸解氮含量却呈极显著负相关( $P<0.01$ );根腐病发病率与镰刀菌属、曲霉属的相对丰度均呈显著正相关( $P<0.05$ )。综上,制种玉米连作生产中土壤有效态氮,特别是酸解氮和非酸解氮的含量与优势病原菌的相对丰度、根腐病发病率均呈显著正相关( $P<0.05$ ),可用来准确地预测玉米根腐病的发生。

**关键词** 制种玉米;连作;土壤氮;根腐病;酸解氮

中图分类号 S143.1;S154.3

文章编号 1007-4333(2024)02-0023-13

文献标志码 A

## Effects of continuous corn seed production on the soil nitrogen distribution and incidence of root rot

FU Wenjiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yunchen<sup>1\*</sup>, WANG Wenli<sup>1</sup>, YAN Zhibin<sup>3</sup>, WANG Zhijiang<sup>1</sup>,  
CHEN Ye<sup>1</sup>, CHEN Guangquan<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural and Ecological Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China;

3. Gansu Dunhuang Seed Industry Research Institute, Jiuquan 735000, China)

**Abstract** To explore the relationship between endophyte, soil nitrogen and the incidence of root rot, field experiment was conducted and high-throughout sequencing technology were adopted to investigate five

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 甘肃省重点研发项目(22YF7NG128);国家自然科学基金(41867010);甘肃省玉米种业全产业链关键技术联合攻关与示范项目(21ZD10NF003)

作者简介: 甫文疆(ORCID:0009-0002-5534-0216),硕士研究生,E-mail: 2597822553@qq.com

通讯作者: 赵芸晨(ORCID:0000-0002-1683-7695),教授,主要从事土壤微生态与植物营养研究,E-mail: 15193418068@163.com

different continuous cropping years fields (5, 10, 15, 20, 25 years). The plots that seed corn were never been planted was taken as control (CK). The endophytic bacteria and the content of different form of nitrogen in soil was also determined. Compared with CK, the content of soil total nitrogen decreased significantly to 0.72 g/kg and the content of ammonium nitrogen increased to 72.97 mg/kg in 25 years continuous cropping plots. The content of nitrate nitrogen and hydrolyzed nitrogen increased first and then decreased. The content of acidolytic nitrogen, hydrolyzed nitrogen and ammonium nitrogen increased significantly, while ammonia nitrogen decreased significantly in the five different continuous cropping plots. With exception of continuous cropping of five years, the content of amino acid nitrogen increased significantly, while the content of total nitrogen, non-acidolytic nitrogen and amino sugar nitrogen decreased significantly ( $P < 0.05$ ). At the genus level, there were 13 dominant bacteria genera in the root of maize, among which *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Sphingomonas*, *Pedobacter* and *Pantoea* had the highest abundance. There were ten dominant fungi genera, among which *Peniophora*, *Aspergillus*, *Schizophyllum* and *Phialemoniopsis* had the highest abundance. The continuous cropping had no significant effect on the types of bacteria and fungi rhizobacteria, but the relative abundance was changed in different continuous cropping years. The incidence of root rot of seed corn increased significantly. The incidence of root rot was positively correlated with the contents of soil acidolytic nitrogen, amino acid nitrogen, hydrolyzed nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen ( $P < 0.01$ ), but negatively correlated with content of soil total nitrogen and non-acidolytic nitrogen ( $P < 0.01$ ). The incidence of root rot was positively correlated with the relative abundance of *Fusarium* and *Aspergillus* ( $P < 0.05$ ). In conclusion, the contents of soil available nitrogen, especially acidolytic nitrogen and non-acidolytic nitrogen were significantly correlated with the relative abundance of dominant pathogens and the incidence of root rot in corn seed production ( $P < 0.05$ ), which could be used to accurately predict the occurrence of root rot in maize production.

**Keywords** corn seed production; continuous cropping; soil nitrogen; root rot; acidolytic nitrogen

玉米种植在我国具有十分重要的战略意义<sup>[1]</sup>。河西走廊独特的自然条件促使其成为我国目前最大的玉米种子生产基地<sup>[2]</sup>。由于制种利益丰厚,制种基地间竞争激烈,张掖市仅大型制种企业就有上百家;此外,制种地块连作严重,个别地块连作超30年,土壤性质变劣、土传病害发病率逐年上升,产量损失高达40%<sup>[3-4]</sup>,产品品质下降。根际微生物群落多样性改变,以镰刀菌、腐霉菌、立枯丝核菌为主的病原菌丰度增加,玉米根腐病发病率增加,给生产带来极大的经济损失,严重影响粮食安全问题<sup>[5]</sup>。因此,制种玉米连作生产过程中根腐病发生的预测与防控对我国玉米种子健康可持续发展具有重要的意义。

氮素是肥料三要素之一,在维持土壤无机氮供应能力方面具有重要的意义<sup>[6]</sup>。我国农田土壤氮含量普遍不高,土壤全氮95%以上为有机态氮,是无机氮的源和库<sup>[7-8]</sup>。由于当季植物可利用的有效态氮素仅占一小部分,因此在农业生产中农民通过大量施用氮肥来提高产量。而我国氮肥年平均利用率仅30%~50%<sup>[9]</sup>,较其他国家利用率偏低,导致我

国成为世界上氮肥年施用量最大的国家之一,单位面积氮施用量远超世界平均水平<sup>[10]</sup>。Li等<sup>[11]</sup>与Zhao等<sup>[12]</sup>研究表明在不同土壤条件下土壤氮素组成发生变化,影响作物对土壤氮素的吸收与转化<sup>[13]</sup>。目前对于制种玉米连作生产过程中,不同连作年限的土壤氮素组分特征以及制种玉米连作对土壤氮素含量的影响有待明确。已有研究表明,根腐病发病率与土壤速效磷含量呈显著正相关<sup>[14]</sup>,植物内生菌可以促进土壤中磷素循环<sup>[15]</sup>。氮素营养会影响植物的感病性或抗病性<sup>[16]</sup>,缺氮可以提高植物对镰刀菌属侵染的敏感性<sup>[17]</sup>。目前制种生产过程中,病害发生规律与氮素含量特征及根部内生菌间相关性等问题还没有明确结论,特别是长期制种玉米连作条件下土壤氮素的组分特征及吸收转化规律以及内生菌动态变化还鲜见报道。本研究以长期连作地块为研究对象,测定未种植玉米(CK)及连作(5、10、15、20、25年)地块的土壤不同氮素含量与玉米根内微生物,同时调查根腐病发病率。分析土壤有机氮与无机氮的变化规律、根部内生菌群群落特征以及根腐病发生规律,旨在探究制种玉米连

作根内微生物变化、土壤氮素组成特征与根腐病发病之间的相关关系,以期对制种玉米高效生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省张掖市甘州区小满镇大柏村(100°15′~100°20′ E, 38°59′~39°42′ N),该区年均气温7.5℃,年蒸发量2 000~2 100 mm,年均降水200~243 mm,全年无霜期130~170 d,为多年制种玉米生产大区,区内主打产业为玉米制种,地块连作现象严重,个别地块连作超30年,该区土壤类型为灌淤土,土壤质地为砂质壤土。

### 1.2 供试材料

供试玉米品种为‘郑单958’,由中天种业股份有限公司提供,平均芽率99%,净度99%。

### 1.3 试验处理

供试地块的种植背景、施肥及管理模式基本相同,但连作年限不同(5、10、15、20和25年),以未种植过制种玉米的地块(0年)为对照(CK)。种植过程不施用有机肥,只施磷酸氢二铵( $P_2O_5$  46 g/100 g, N 16 g/100 g) 515 kg/hm<sup>2</sup>、尿素(N 46 g/100 g) 735 kg/hm<sup>2</sup>及硫酸锌(ZnO 23 g/100 g) 30 kg/hm<sup>2</sup>,全部磷肥、全部锌肥和1/3氮肥为底肥,剩余2/3氮肥分别在大喇叭口及抽雄期2次追施,其他田间管理(放苗、间苗、定苗、抽雄、割除父本、灌水等)模式相同。母本与父本错期播种,提前10 d播种母本(♀),两期父本(♂)分别于母本播种后第10、15天播种,父母本种植模式为1:5行比加满天星方式,整个生育期共灌水5次,用水7 500~8 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

### 1.4 根腐病发病率调查

五叶期至十叶期,在不同连作年限地块统计制种玉米根腐病发病数,每个地块选取玉米30株,参照Chen等<sup>[5]</sup>方法计算发病率,判定严重度,计算病情指数。

### 1.5 土样采集

在制种玉米乳熟期,采用5点法,采集不同连作年限(5~25年)制种玉米田耕层(0—20 cm)土壤样品,将混合样品剔除植物残体及地膜碎片,经风干研磨后过1.00和0.25 mm土壤筛,混匀后装瓶备用。

### 1.6 土样测定分析

有机质测定采用重铬酸钾容量法,全氮测定采

用硫酸双氧水消煮-凯氏定氮法,铵态氮测定采用靛酚蓝比色法,硝态氮测定采用紫外分光光度法,水解氮测定采用碱解扩散法<sup>[18]</sup>。有机氮组分采用Bremner法<sup>[19]</sup>,其中,酸解氮用凯氏定氮法;酸解氨态氮用氧化镁蒸馏法;(氨+氨基糖态氮)用磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸汽蒸馏法;氨基酸态氮用茚三酮氧化法,磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸汽蒸馏法;非酸解态氮、酸解氨基糖态氮和酸解未知态氮分别用差减法求得。土壤pH测定采用酸度计pHS-3C(上海精科雷磁,水:土质量为5:1)。

### 1.7 植株内生菌测定

在制种玉米乳熟期,在对照(CK、0年)及不同连作年限地块(5~25年)采集健康植株18株,于第一茎节处剪下根部并迅速放入冰盒内,带回实验室。根表面用流水冲洗干净后,用酒精擦拭表面,再用0.2% HgCl<sub>2</sub>浸泡1~2 min,然后选取内生菌丰富区域<sup>[20]</sup>,切取若干大小均匀样品(1 cm×1 cm),随机选取20 g左右植株样品,干冰保存运输,进行高通量测序(真菌:ITS1 + ITS2,细菌:V4-V5区域),由广州美格基因有限责任公司完成测序,每3株混合作为1个生物学重复,设6个生物学重复,分析制种玉米优势内生菌群及其多样性。

### 1.8 数据分析

采用SPSS 23.0进行方差分析和多重比较,最小显著差异法(LSD)进行差异显著性分析,测定结果以平均值±标准差展示;数据分析与图表处理采用RV4.1.1处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 连作对土壤pH、有机质及氮组分的影响

由表1可知,随着连作年限增加,土壤pH持续增加,连作25年土壤pH最高,达到8.68;土壤有机质呈下降趋势,连作25年最低,为19.81 g/kg;与对照(CK)相比,5个连作地块的酸解氮、水解氮和铵态氮含量均显著增加,氨态氮含量显著下降;此外,除连作5年的地块外,其余4个连作地块的氨基酸态氮含量显著增加,全氮、非酸解氮和氨基糖态氮含量显著下降。其中与对照(CK)相比,连作25年地块的土壤全氮显著下降,至0.72 g/kg,铵态氮含量显著升高,至72.97 mg/kg;氨态氮含量在连作25年时最低,为3.69 mg/kg;土壤水解氮与硝态氮含量均无明显变化规律,变幅分别为45.43~78.30与

表1 制种玉米不同连作年限土壤pH、有机质及不同氮组分变化

Table 1 Changes of soil pH, organic matter and different nitrogen components in different continuous cropping years of corn seed production

| 连作年限/年<br>Continuous<br>cropping years | pH          | 有机质/(g/kg)<br>Organic<br>matter | 全氮/(g/kg)<br>Total nitrogen | 酸解氮/(mg/kg)<br>Acid hydrolysable<br>nitrogen | 非酸解氮/<br>(mg/kg)<br>Non-acidolytic<br>nitrogen | 氨基糖态氮/<br>(mg/kg)<br>Amino sugar<br>nitrogen |
|----------------------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0(CK)                                  | 8.21±0.01 c | 25.03±0.82 a                    | 1.22±0.01 a                 | 33.15±1.01 d                                 | 908.15±12.48 a                                 | 6.46±0.07 a                                  |
| 5                                      | 8.59±0.01 b | 23.66±0.71 b                    | 1.25±0.01 a                 | 34.39±1.45 c                                 | 897.21±15.33 a                                 | 6.16±0.12 a                                  |
| 10                                     | 8.61±0.00 b | 22.96±0.49 bc                   | 0.82±0.01 b                 | 34.29±0.72 c                                 | 787.47±15.26 b                                 | 5.69±0.14 b                                  |
| 15                                     | 8.63±0.01 b | 21.63±0.64 cd                   | 0.75±0.01 b                 | 38.13±0.72 b                                 | 708.34±14.17 c                                 | 4.41±0.18 c                                  |
| 20                                     | 8.66±0.01 a | 20.85±0.58 de                   | 0.74±0.03 b                 | 40.60±0.72 a                                 | 681.43±28.35 c                                 | 4.32±0.13 c                                  |
| 25                                     | 8.68±0.01 a | 19.81±0.76 e                    | 0.72±0.01 b                 | 41.07±0.72 a                                 | 665.47±14.90 d                                 | 4.06±0.07 c                                  |

| 连作年限/年<br>Continuous<br>cropping years | 氨基酸态氮/<br>(mg/kg)<br>Amino acid<br>nitrogen | 未知态氮/<br>(mg/kg)<br>Unknown<br>nitrogen | 氨态氮/<br>(mg/kg)<br>Ammoniacal<br>nitrogen | 水解氮/(mg/kg)<br>Hydrolysable<br>nitrogen | 铵态氮/<br>(mg/kg)<br>Ammonium<br>nitrogen | 硝态氮/<br>(mg/kg)<br>Nitrate nitrogen |
|----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| 0(CK)                                  | 14.39±0.83 d                                | 8.23±0.09 c                             | 5.84±0.03 a                               | 52.18±3.01 d                            | 35.38±2.01 e                            | 3.54±0.02 d                         |
| 5                                      | 15.43±0.58 d                                | 7.54±1.40 d                             | 5.24±0.19 b                               | 45.43±3.56 e                            | 38.60±1.46 d                            | 3.38±0.01 d                         |
| 10                                     | 17.37±0.76 c                                | 10.30±1.08 a                            | 5.26±0.24 b                               | 72.61±3.14 b                            | 49.34±1.31 c                            | 5.12±0.22 b                         |
| 15                                     | 19.78±0.58 c                                | 7.92±0.70 c                             | 4.73±0.06 d                               | 62.18±0.44 c                            | 50.33±0.06 c                            | 5.32±0.26 a                         |
| 20                                     | 23.27±0.76 b                                | 8.07±0.19 c                             | 5.03±0.01 c                               | 72.43±3.06 b                            | 62.53±0.67 b                            | 4.40±0.37 c                         |
| 25                                     | 24.51±0.58 a                                | 9.80±0.56 b                             | 3.69±0.14 e                               | 78.30±0.33 a                            | 72.97±2.56 a                            | 4.30±0.08 c                         |

注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
Note: Within the same line, different lowercase letter represented significant difference at  $P$  value less than 0.05. The same below.

3.38~5.32 mg/kg。不同连作年限土壤pH、有机质、各有机态氮组分与无机态氮组分间除pH在连作5、10、15年间差异不显著,酸解氮含量在连作5与10年间差异不显著,氨基酸态氮含量在连作10与15年差异不显著,全氮在连作10、15、20、25年间差异均不显著,非酸解氮含量在连作15与20年差异不显著,氨基糖态氮含量在连作15、20、25年间差异均不显著,铵态氮含量在连作10与15年差异不显著,氨态氮含量在连作5与10年差异不显著,其余不同连作年限间差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。

2.2 连作对制种玉米根腐病发病率的影响

由表2可知,不同连作年限的制种玉米田根腐病发病率存在较大差异,随着连作年限的增加,根腐病发病率持续上升,连作20年制种地块发病率最高,达到11.5%,病情指数15.12;而连作25年地块

平均发病率10.1%,病情指数13.44,根腐病发病率较连作20年下降,但差异不显著。其次,非连作地块(0年)平均发病率2.2%,病情指数4.33,连作5年地块根腐病平均发病率5.1%,病情指数8.34;连作10年地块平均发病率5.4%,病情指数8.71;连作15年地块平均发病率6.5%,病情指数9.34。因此,连作导致制种玉米根腐病发病率增加,且随连作年限增加,发病率显著增加( $P<0.05$ )(表2)。

2.3 连作对制种玉米根内微生物Alpha多样性的影响

由图1可知,随连作年限的增加,根内细菌群落的Richness、Chao 1、Simpson指数均显著降低( $P<0.05$ ),即连作会导致制种玉米根内细菌群落的多样性和丰富度显著降低;同时根内真菌Richness、Chao 1、Simpson指数均随连作年限的增加呈现显

表 2 制种玉米不同连作年限玉米根腐病发病率与病情指数

Table 2 Incidence rate and disease index of root rot in different years of continuous cropping

| 连作年限/年<br>Continuous<br>cropping years | 发病率/%<br>Incidence rate | 病情指数<br>Disease index |
|----------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 0(CK)                                  | 2.2±0.22 e              | 4.33±0.22             |
| 5                                      | 5.1±0.22 d              | 8.34±0.41             |
| 10                                     | 5.4±0.31 d              | 8.71±0.34             |
| 15                                     | 6.5±0.35 c              | 9.34±0.80             |
| 20                                     | 11.5±0.94 a             | 15.12±1.22            |
| 25                                     | 10.1±0.72 ab            | 13.44±0.98            |

著降低趋势( $P<0.05$ ),表明连作可显著降低制种玉米根内真菌群落的多样性和丰富度。

2.4 连作对制种玉米根内微生物群落结构组成的影响

由图 2 可知,制种玉米根内细菌门水平主要由变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、

厚壁菌门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)组成。此外,制种玉米根内真菌门水平主要由子囊菌门(Ascomycetes)和担子菌门(Basidiomycetes)组成(图 2(b))。

由图 3 可知,相对丰度 $>2\%$ 的玉米内生细菌菌属有假单胞菌属(*Pseudomonas*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、地杆菌属(*Pedobacter*)、泛菌属(*Pantoea*)、红球菌属(*Rhodococcus*)、代尔夫特菌属(*Delftia*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、短波单胞菌属(*Brevundimonas*)、鞘脂菌属(*Sphingobium*)、*Luteolibacter*与*Sphingorhabdus*,共 13 个属。随连作年限延长,假单胞菌属、节杆菌属、芽孢杆菌属、短波单胞菌属、地杆菌属、鞘脂菌属、*Sphingorhabdus*与*Lactobacillus*的相对丰度先上升后下降,根瘤菌属、鞘氨醇单胞菌属、泛菌属、红球菌属及代尔夫特菌属的相对丰度上升(图 3(a))。内生真菌属水平上,相对丰度 $>2\%$ 的属有隔孢伏革属(*Peniophora*)、曲霉属(*Aspergillus*)、裂褶菌属(*Phialemoniopsis*)、*Schizophyllum*、*Cyphellophora*、*Edenia*、枝孢属(*Cladosporium*)、红曲霉属

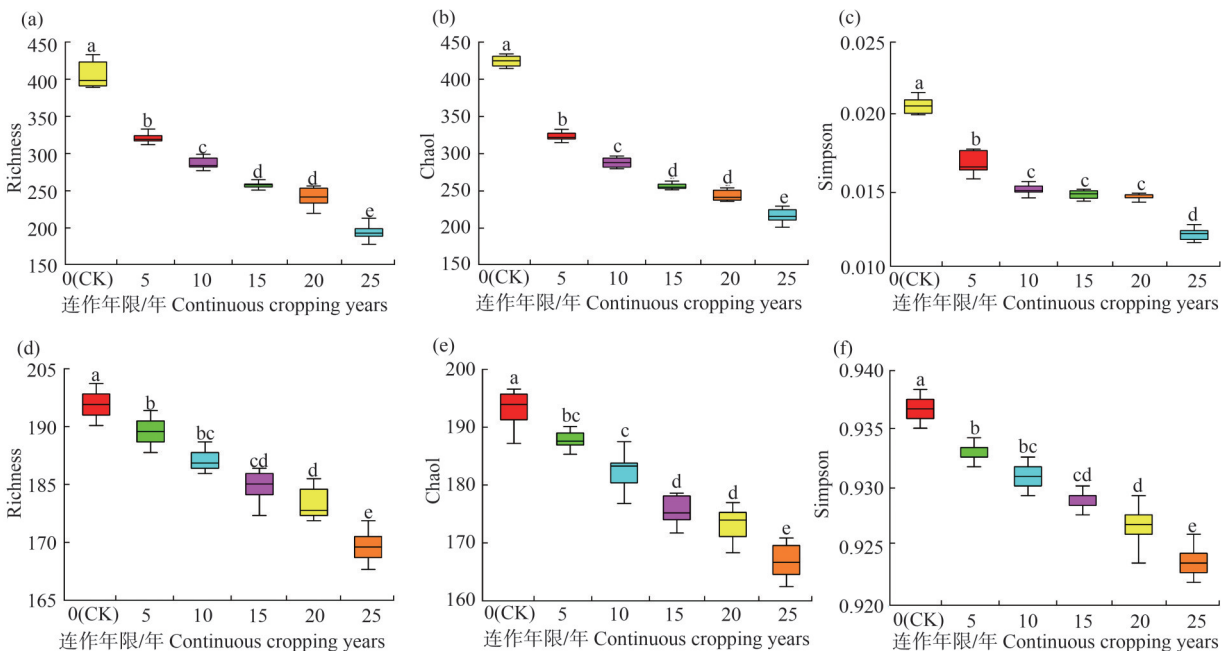


图 1 制种玉米连作根内生微生物 Alpha 多样性

Fig. 1 Alpha diversity of endomicrobe in continuous cropping of corn seed production

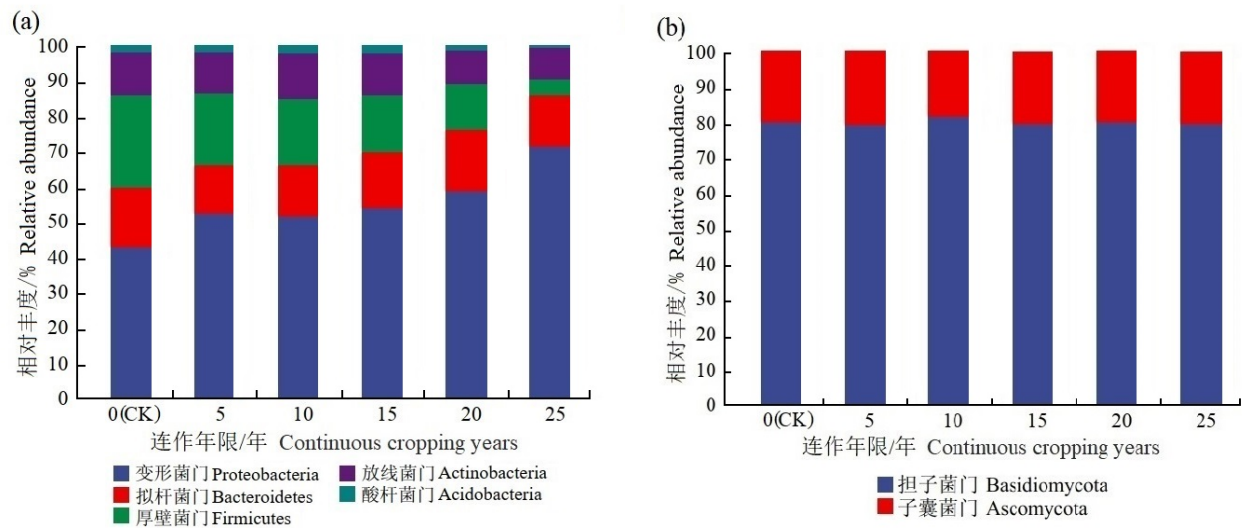


图2 制种玉米根内生细菌(a)与真菌(b)门变化

Fig. 2 Variation of phylum of root endophytic bacteria (a) and fungi (b) in corn seed production

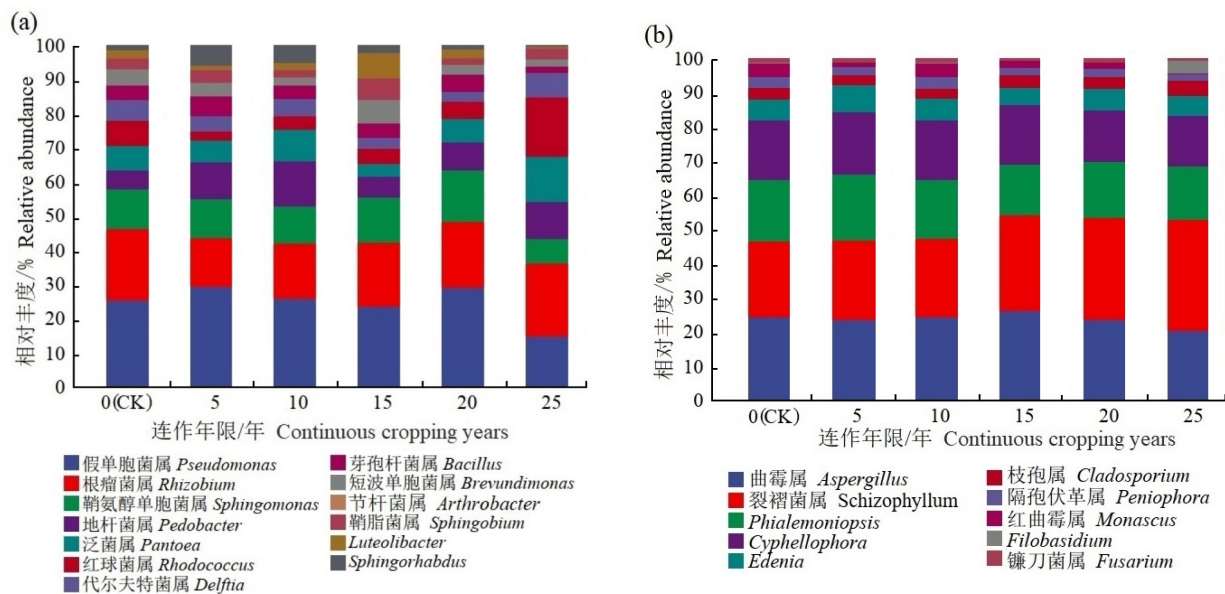


图3 制种玉米根内生细菌(a)与真菌(b)属变化

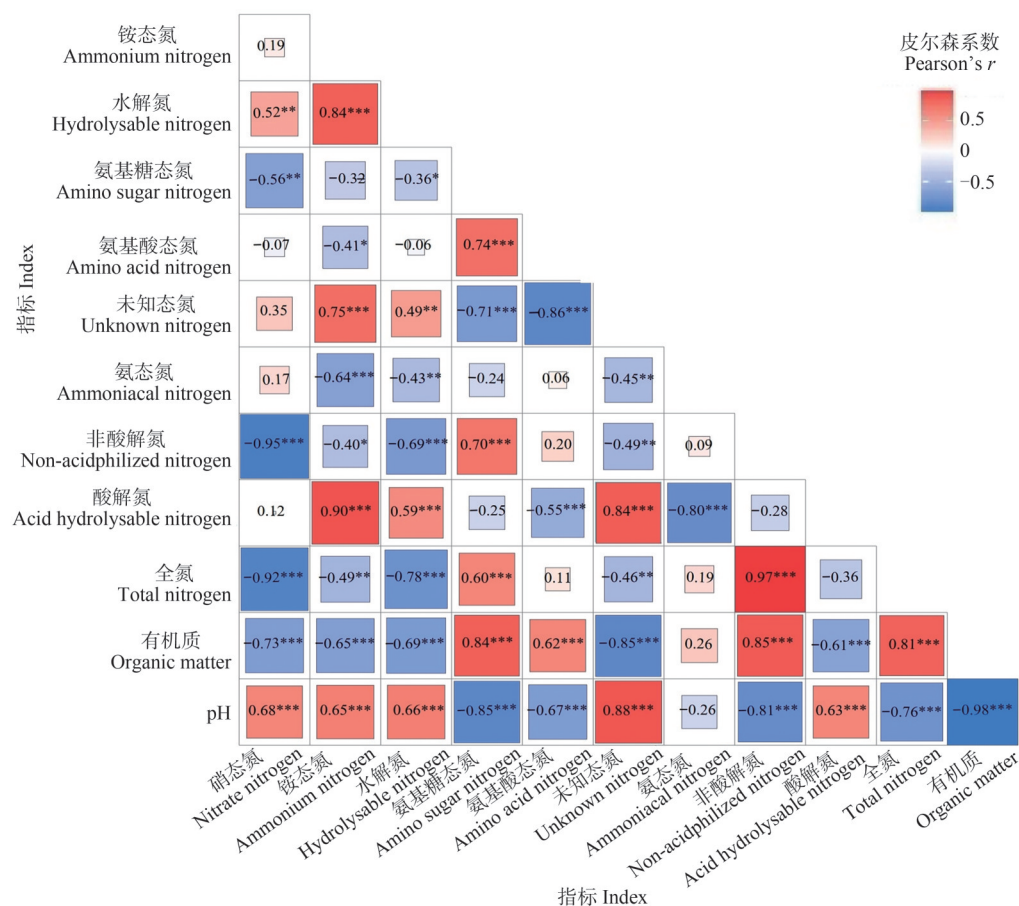
Fig. 3 Variation of genus of root endophytic bacteria (a) and fungi (b) in corn seed production

(*Monascus*)、镰刀菌属(*Fusarium*)与*Filobasidium*共10属;随连作年限的延长,曲霉属、隔孢伏革属、镰刀菌属与*Edenia*属相对丰度上升,裂褶菌属、*Schizophyllum*、*Cyphellophora*、枝孢属、*Filobasidium*与红曲霉属的相对丰度下降(图3(b))。综上,制种连作对玉米根内细菌与真菌菌属类型的改变无显著影响,只改变了根内细菌与真菌属的相对丰度,

制种玉米内生菌群落结构特征发生变化。

## 2.5 土壤pH、有机质与土壤氮组分间的相关性

由图4可知,土壤pH、有机质含量均与土壤全氮、非酸解氮、未知态氮、氨态氮含量呈极显著负相关,与土壤酸解氮、水解氮及铵态氮含量呈极显著正相关。全氮与非酸解氮、氨态氮含量均呈极显著正相关,与酸解氮、氨基酸态氮、水解氮、硝态氮、铵



\*, \*\*和\*\*\*分别代表  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  和  $P < 0.001$  水平上显著。

\*, \*\* and \*\*\* represent significant differences at  $P$  value less than 0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

图4 制种玉米土壤pH、有机质及氮组分间相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of pH, organic matter and nitrogen components in corn seed production

态氮含量均呈极显著负相关；酸解氮含量与氨基糖态氮、未知态氮含量均呈极显著负相关，与铵态氮、氨基酸态氮含量均呈极显著正相关；非酸解氮含量与氨基酸态氮、水解氮、铵态氮、硝态氮含量均呈显著负相关，与铵态氮却呈极显著正相关；氨基糖态氮含量与氨基酸态氮、水解氮、铵态氮含量均呈极显著负相关；氨基酸态氮含量与未知态氮、氨态氮含量都呈极显著负相关，与水解氮、铵态氮含量均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；未知态氮与氨态氮含量呈极显著正相关；氨态氮含量与硝态氮含量极显著负相关；水解氮含量与铵态氮、硝态氮含量均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

## 2.6 根腐病发病率与土壤pH、有机质及氮组分间的相关性

由图5可知，玉米根腐病发病率与土壤pH、土壤氨基酸态氮、酸解氮、水解氮、铵态氮及硝态氮含

量均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；与土壤有机质、土壤全氮、非酸解氮及氨基糖态氮含量均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；与土壤氨态氮和未知态氮含量均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。

## 2.7 制种玉米根内优势菌属与土壤pH、有机质及氮组分间的相关性

由图6可知，根瘤菌(*Rhizobium*)相对丰度与土壤pH及硝态氮、酸解氮、氨基酸态氮含量均呈显著正相关，与有机质、全氮、非酸解氮、氨态氮含量均呈显著负相关；鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)相对丰度与有机质、全氮、氨基糖态氮含量均呈显著负相关，与酸解氮、氨基酸态氮、水解氮、铵态氮含量均呈显著正相关；红球菌属(*Rhodococcus*)、泛菌属(*Pantoea*)相对丰度与土壤pH、硝态氮含量均呈显著正相关，与有机质、全氮、非酸解氮、氨态氮含量均呈显著负相关；芽孢杆菌属(*Bacillus*)相对丰度与

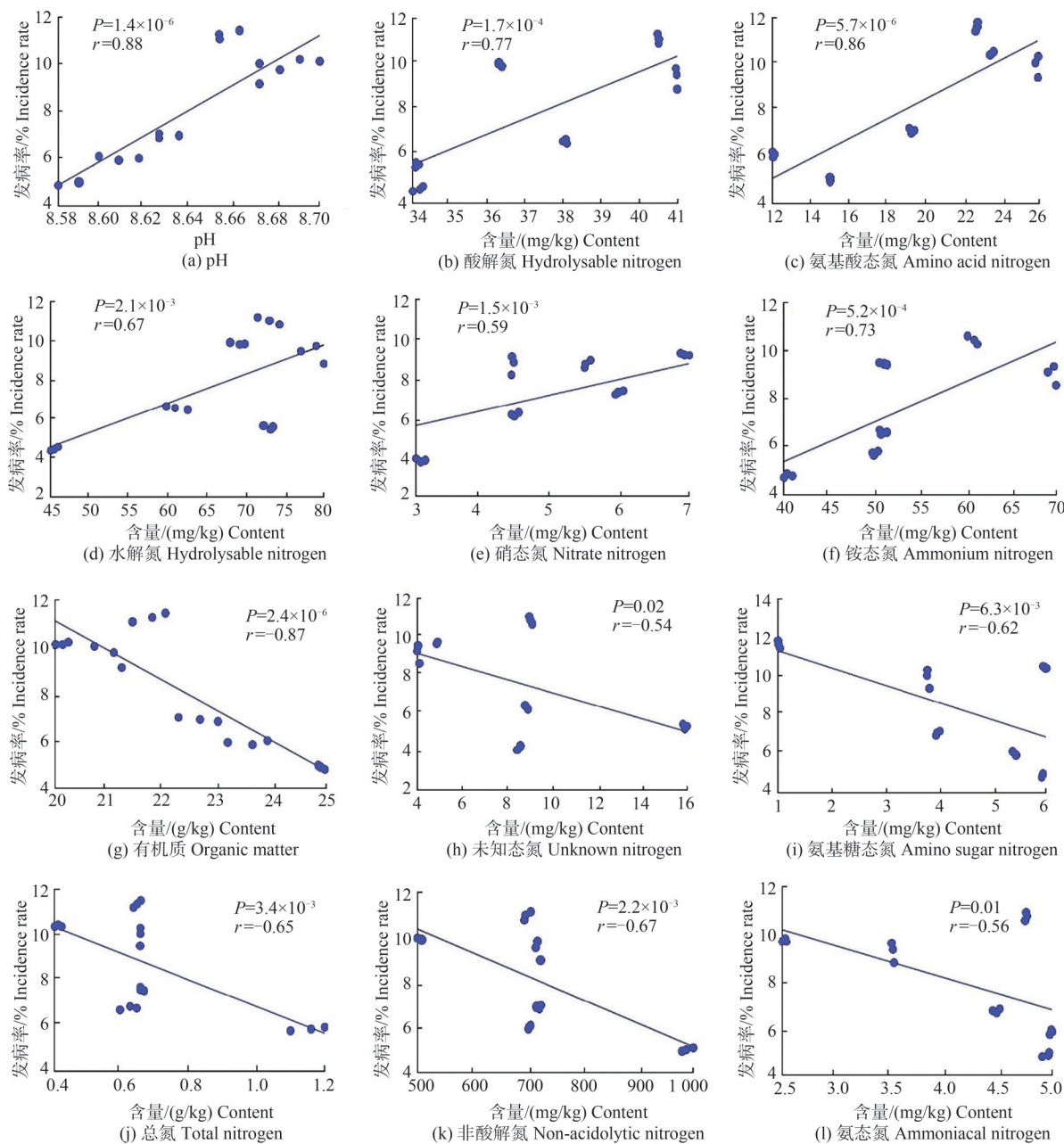


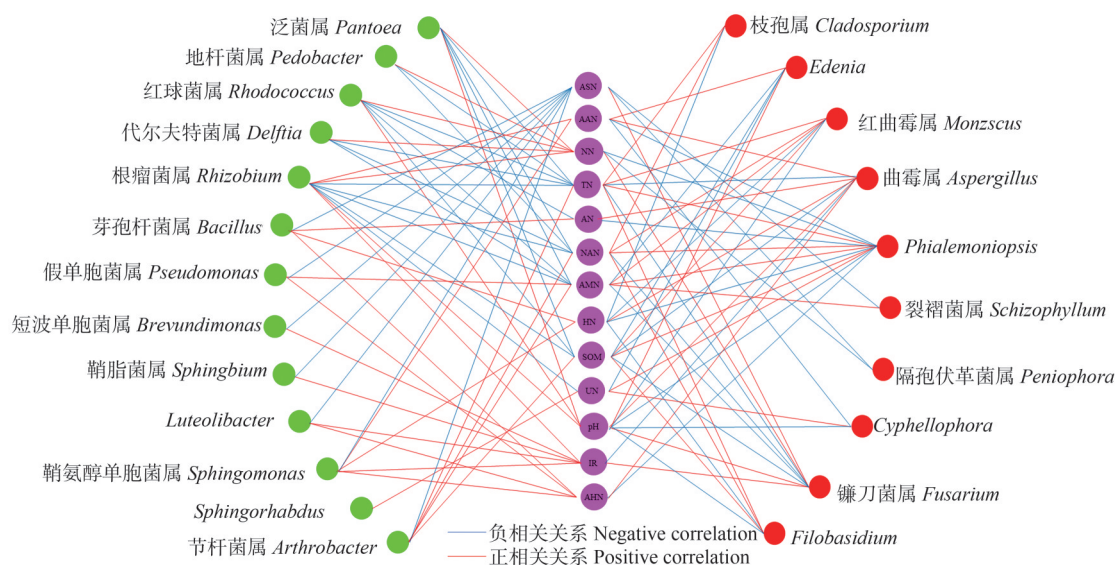
图5 制种玉米根腐病发病率与土壤pH、有机质、氮组分和含量的相关性分析

Fig. 5 Correlation between incidence rate of root rot disease and pH, organic matter and nitrogen distribution of seed corn production

酸解氮、水解氮及铵态氮含量均呈显著正相关,与氨基糖态氮含量却呈显著负相关;节杆菌属(*Arthrobacter*)相对丰度与氨基糖态氮含量显著负相关,与氨态氮含量显著正相关;短波单胞菌属(*Brevundimonas*)、鞘脂菌属(*Sphingobium*)、*Luteolibacter*相对丰度与氨基糖态氮含量显著负相关;假单胞菌属(*Pseudomonas*)相对丰度与铵态氮含量显著正相关,与氨基糖态氮含量显著负相关;

地杆菌属(*Pedobacter*)相对丰度与氨态氮及全氮含量显著负相关,与硝态氮含量呈显著正相关;代尔夫特菌属(*Delftia*)相对丰度与硝态氮含量呈显著正相关、与全氮、氨态氮、非酸解氮含量呈显著负相关;*Sphingorhabdus*相对丰度与未知态氮含量呈显著正相关。

由图6可知,隔孢伏革属(*Peniophora*)相对丰度与酸解氮及氨态氮含量均呈显著正相关,与氨基



ASN, AAN, NN, TN, AN, NAN, AMN, HN, SOM, UN, IR 和 AHN 分别代表氨基糖态氮, 氨基酸态氮, 硝态氮, 全氮, 铵态氮, 非酸解氮, 氨态氮, 水解氮, 有机质, 未知态氮, 发病率及酸解氮; 红线与蓝线分别代表皮尔森相关系数  $r > 0.6$ , 显著性  $P < 0.05$  时的正相关与负相关关系。

ASN, AAN, NN, TN, AN, NAN, AMN, HN, SOM, UN, IR and AHN represent amino sugar nitrogen, amino acid nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, ammonium nitrogen, non-acidolytic nitrogen, ammoniacal nitrogen, hydrolysable nitrogen, organic matter, unknown nitrogen, incidence rate and acid hydrolysable nitrogen, respectively; The red and blue lines represent the positive and negative correlations when the Pearson correlation coefficient  $r$  is greater than 0.6 and the significance  $P$  is less than 0.05, respectively.

图6 制种玉米根内优势菌属与土壤pH、有机质、氮组分及根腐病发病率间相关性分析

Fig. 6 Correlation among dominant bacteria and fungi genera with soil pH, SOC and root rot incidence rate of seed corn production

糖态氮及硝态氮显含量显著负相关; 曲霉属 (*Aspergillus*) 相对丰度与 pH、酸解氮、氨基酸态氮、水解氮及铵态氮含量均呈显著正相关, 与有机质、全氮、非酸解氮及氨态氮含量均呈显著负相关; *Phialemoniopsis* 相对丰度与硝态氮含量均呈显著负相关; 裂褶菌属 (*Schizophyllum*) 与氨基糖态氮、硝态氮含量均呈显著负相关, 与氨态氮含量显著正相关; *Cyphellophora* 相对丰度与 pH、氨基酸态氮含量均呈显著负相关, 与氨态氮及有机质含量均呈显著正相关; 枝孢属 (*Cladosporium*) 相对丰度与全氮、非酸解氮含量均呈显著正相关, 与水解氮含量显著负相关; 镰刀菌属 (*Fusarium*) 相对丰度与 pH、酸解氮、氨基糖态氮、氨基酸态氮、水解氮含量均呈显著正相关, 与有机质含量显著负相关; *Filobasidium* 相对丰度与全氮、非酸解氮、有机质含量均呈显著正相关, 而与水解氮含量、pH 均呈显著负相关; 红曲霉属 (*Monascus*) 与硝态氮、水解氮含量及 pH 均呈显著负相关, 与全氮、氨态氮、非酸解氮、有机质含量均呈显著正相关。制种玉米根腐病发病率与内生菌根瘤菌 (*Rhizobium*)、短波单孢菌属 (*Brevundimonas*)、鞘氨

醇单孢菌属 (*Sphingomonas*)、鞘酯菌属 (*Sphingobium*) 及 *Luteolibacter* 镰刀菌属 (*Fusarium*) 相对丰度均呈显著正相关, 与曲霉菌属则呈显著负相关 (图6)。

### 3 讨论

#### 3.1 制种玉米连作对土壤氮组分含量影响

氮是农业生产中最重要的养分限制因子<sup>[21]</sup>。本研究中长期连作制种玉米田的全氮含量持续下降, 无机态氮含量随连作年限增加而增加, 铵态氮含量显著高于硝态氮, 铵态氮与硝态氮含量变化不同步, 说明长期制种玉米连作不利于土壤氮素积累, 与田秀平等<sup>[22]</sup>结论一致, 这可能与本地土壤胶体特性及干燥气候以及长期施用单一品种化学肥料导致土壤 pH 变化有关<sup>[23-24]</sup>。土壤氮素吸收利用率受到其他条件影响较大, 但总体变化趋势与赵芸晨等<sup>[25]</sup>、程红玉等<sup>[26]</sup>研究一致。

土壤有机态氮对保持土壤氮素平衡起着重要作用<sup>[27]</sup>, 直接决定土壤潜在供氮能力的高低<sup>[28]</sup>; 且有机氮组分结构直接影响土壤氮素的有效性<sup>[29]</sup>, 与

无机氮供应能力密切相关<sup>[30]</sup>。安宗胜等<sup>[27]</sup>研究表明土壤有效态氮主要来源于酸解氮矿化,与微生物的生物合成和土壤真菌密切相关。本研究随种植年限增加,土壤酸解态氮发生矿化,氨基糖态氮含量下降,这可能是由于仅供应部分无机氮<sup>[31]</sup>,在长期连作制种生产中未能及时补充有机氮所致。土壤非酸解氮是稳定的土壤氮库,含量约占土壤全氮10%~20%<sup>[32-34]</sup>。本研究中土壤非酸解氮含量下降导致土壤氮库下降。土壤总有机态氮含量下降导致有机氮库下降,土壤供氮能力降低<sup>[34]</sup>。长期制种玉米连作氮组分含量发生变化,无机氮含量显著增加,有机氮含量显著下降,土壤氮库容量显著下降,土壤总体消耗水平大于积累水平,全氮水平下降,应采取相应措施恢复土壤氮素水平。

### 3.2 制种玉米连作对根内微生物影响

Li等<sup>[35]</sup>研究表明连作生产导致土壤微生物多样性动态平衡被打破,微生物区系改变,有益微生物减少,有害微生物增加,土传病害发生概率增加。本研究中连作制种显著降低玉米根内微生物群落的多样性和丰富度,这与彭三妹等<sup>[36]</sup>研究结果一致。致病性病原菌属镰刀菌及曲霉属相对丰度增加,但有益假单胞菌及根瘤菌属相对丰度也有所增加,说明连作有利于寄主特异性病原菌的发展。本制种区高发病害的致病性病原菌类型及丰度增加。特异性病原菌的入侵及丰度的增加导致玉米根际分泌物发生变化,促进了根际分泌物与微生物互作,呈现出被宿主植物选择性招募的根际微生物,进而在宿主内定殖<sup>[37-38]</sup>。病害发病可能性较非连作地块显著增加,进而影响到其他内生菌在玉米根内定殖的概率与可能性。故制种玉米连作土壤中微生物群落结构在时间尺度上变化明显,特异性微生物群体被定向招募并形成特异菌群,需要进一步加强定向调控,了解有益菌与病原菌互作机制,从而能够平衡构建健康微生物群落。

### 3.3 土壤氮组分及玉米根内内生菌与根腐病发病率间相关性

本研究中,根腐病发病率与土壤酸解氮、氨基酸态氮、水解氮、铵态氮及硝态氮含量均呈极显著正相关,而与土壤全氮呈极显著负相关,这与高游慧等<sup>[39]</sup>研究结果一致,土壤氮含量较低的情况下,根腐病的发生明显减轻<sup>[40-41]</sup>。Sörenu等<sup>[42]</sup>研究发现施氮后来自变形菌门的病原细菌丰度的提高也会

导致根腐病的加剧。本研究中致病性曲霉菌及镰刀菌相对丰度与酸解氮、氨基酸态氮、水解氮含量均呈显著正相关,上述氮组分含量与致病菌数量均增加。三七黑斑病病原菌(*Altemaria panax* Whetzel)可优先利用有机氮源<sup>[43]</sup>,枯萎病(*Fusarium oxysporum*)发病土壤中总有机氮含量显著高于健康土壤<sup>[44]</sup>。本研究中酸解氮含量与芽孢杆菌相对丰度呈显著正相关关系,酸解氮矿化过程受芽孢杆菌驱动<sup>[45-46]</sup>,因此,不同氮素水平变化可以作为根腐病发病状况的预测指标,合理施氮会显著增加植株抗病性<sup>[47]</sup>。因此,制种玉米连作应科学施氮,避免根腐病发病加剧。特别应密切关注有机氮含量的变化,利用土壤有机氮对病原真菌繁殖的驱动作用,以及不同氮组分及含量对作物根腐病的影响<sup>[48-50]</sup>,通过调控氮素含量与微生物群落间相互关系,影响玉米根内内生菌定殖及群落丰度,进而有效控制根腐病的发生。

### 3.4 制种玉米连作土壤环境特征与根腐病发病率相关性

已有研究表明铵态氮施用会加剧根腐病发生<sup>[51]</sup>,根腐病发生随土壤pH升高而增加,随土壤有机质含量升高而降低<sup>[52]</sup>。此外,氮肥施用会导致土壤pH变化,导致土壤中氮素组分发生极大变化,进而影响微生物群落的分布,从而影响根腐病发病率<sup>[53]</sup>。本研究制种玉米连作使土壤pH上升、有机质含量减少,且镰刀菌属相对丰度与土壤pH显著正相关,进而会加剧根腐病的发生。因此在制种玉米生产过程中应密切关注土壤环境的变化,通过环境特征动态变化趋势预测病害发生的可能性。

## 4 结 论

长期制种玉米连作导致河西走廊中部土壤有机态氮含量显著下降,无机态氮含量显著增加,土壤氮库容量显著下降;根腐病发病率显著增加。此外,长期制种连作导致玉米根内内生菌多样性与丰富度显著降低,根内特异性致病菌与有益菌属的相对丰度均显著增加,玉米根内内生菌群落结构定向改变,并特异性分布。综上,制种玉米生产过程中土壤酸解氮和非酸解氮的含量与优势病原菌的相对丰度、根腐病发病率均呈显著正相关。因此,可以根据河西走廊中部制种玉米区土壤酸解氮及非酸解氮的含量变化来准确地预测制种玉米根腐病的发生。

## 参考文献 Reference

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959  
Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959 (in Chinese)
- [2] 赵建华. 河西绿洲灌区制种玉米种子生产的水氮效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016  
Zhao J H. Effects of water and nitrogen fertilizer on corn for seed production seed production of maize in Hexi oasis irrigation area [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [3] 邢会琴, 肖占文, 闫吉智, 马建仓, 孟嫣. 玉米连作对土壤微生物和土壤主要养分的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1777-1780  
Xing H Q, Xiao Z W, Yan J Z, Ma J C, Meng Y. Effects of continuous cropping of maize on soil microbes and main soil nutrients [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1777-1780 (in Chinese)
- [4] 李青青, 郭满库, 郭成, 郭建国. 甘肃玉米主要病害发生动态调查[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 161-164  
Li Q Q, Guo M K, Guo C, Guo J G. Occurrence dynamics of maize diseases in Gansu Province[J]. *Plant Protection*, 2014, 40(3): 161-164 (in Chinese)
- [5] Saravanakumar K, Li Y Q, Yu C J, Wang Q Q, Wang M, Sun J N, Gao J X, Chen J E. Effect of *Trichoderma harzianum* on maize rhizosphere microbiome and biocontrol of *Fusarium* Stalk rot [J/OL]. *Scientific Reports*, (2017-05-11). DOI: 10.1038/s41598-017-01680-w
- [6] 王爽, 孙磊, 陈雪丽, 谷学佳, 李伟群, 王晓军, 张磊, 刘颖, 潘亚清, 王玉峰. 不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(03): 387-391  
Wang S, Sun L, Chen X L, Gu X J, Li W Q, Wang X J, Zhang L, Li Y, Pan Y Q, Wang Y F. Effects of different nitrogen fertilization levels on maize yield, nitrogen utilization and inorganic nitrogen content in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(03): 387-391
- [7] 李紫燕, 李世清, 李生秀. 黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4940-4950  
Li Z Y, Li S Q, Li S X. Organic N mineralization in typical soils of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4940-4950 (in Chinese)
- [8] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 5021-5030  
Dang Y A, Wang G D, Li S Q. Variation characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen components in typical soils of Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5021-5030 (in Chinese)
- [9] 张春伦, 朱兴明, 胡思农. 缓释尿素的肥效及氮素利用率研究[J]. 土壤肥料, 1998, (6): 17-20  
Zhang C L, Zhu X M, Hu S N. Study on fertilizer efficiency and nitrogen utilization efficiency of slow-release urea [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1998, (6): 17-20 (in Chinese)
- [10] 焦麟. 长期轮作施肥对土壤有机氮组分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016  
Jiao L. Effects of long-term rotation fertilization on soil organic nitrogen components [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [11] Li Z Y, Guan K Y, Zhou W, Peng B, Jin Z N, Tang J Y, Grant R, Nafziger E D, Margenot A J, Gentry L E, DeLucia E H, Yang W H, Cai Y P, Qin Z Q, Archontoulis S V, Fernández F G, Yu Z J, Lee D Y G, Yang Y F. Assessing the impacts of pre-growing-season weather conditions on soil nitrogen dynamics and corn productivity in the U. S. Midwest[J/OL]. *Field Crop research*, (2022-06-14). DOI: 10.1016/J.FCR.2022.108563
- [12] Zhao F K, Chen L D, Yang L, Sun L, Li S J, Li M, Feng Q Y. Effects of land use and rainfall on sequestration of veterinary antibiotics in soils at the hillslope scale [J/OL]. *Environmental Pollution*, (2020-01-01). DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114112
- [13] 邹洪琴, 李德近, 任科宇, 王伯仁, 蔡泽江, 徐明岗, 段英华. 肥力梯度红壤上不同形态氮库对玉米吸氮量的贡献[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 857-867  
Zou H Q, Li D J, Ren K Y, Wang B R, Cai Z J, Xu M G, Duan Y H. Contributions of various forms of nitrogen to nitrogen uptake by maize in red soil with different fertilities [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 857-867 (in Chinese)
- [14] 何忠俊, 周琼, 张忠萍, 董艳, 范茂攀, 洪常青. 库拉索芦荟根腐病与土壤-植株养分的关系研究[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2009, 24(2): 255-259, 291  
He Z J, Zhou Q, Zhang Z P, Dong Y, Fan M P, Hong C Q. Study on the relationship between root-rot incidence and soil-plant nutrient status for *Aloe vera*(L.) bum F[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: National Edition*, 2009, 24(2): 255-259, 291 (in Chinese)
- [15] Taurian T, Anzuay M S, Angelini J G, Tonelli M L, Luduena L, Pena D, Ibáñez F, Fabra A. Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: Screening for plant growth-promoting activities [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1-2): 421-431
- [16] 段旺军, 杨铁钊, 戴亚, 李东亮. 植物氮素营养与病害发生关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2139-2146  
Duan W J, Yang T Z, Dai Y, Li D L. Advances in the relationships between nitrogen nutrition and disease development in plant species [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(10): 2139-2146 (in Chinese)
- [17] Agrios G N. *Plant Pathology* [M]. California: Academic Press, 1997
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Bremner J. *Inorganic forms of Nitrogen* [M]. Madison: American Society of Agronomy, 1965
- [20] 陈晓琳, 韩国民, 杨扬, 黄勃, 樊美珍. 玉米内生真菌的分离与鉴定[J]. 安徽农业大学报, 2015, 42(6): 892-897  
Chen X L, Han G M, Yang Y, Huang B, Fan M Z. Separation and identification of endophytic fungi from *Zea mays* [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, 42(6): 892-897 (in Chinese)
- [21] 贾世玉. 玉米-小麦-大豆轮作系统土壤有机氮矿化特征对免耕与秸秆覆盖的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2012  
Jia S Y. Response of soil organic nitrogen mineralization characteristics to no-tillage and straw mulching in corn-wheat-soybean rotation system [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012 (in Chinese)
- [22] 田秀平, 薛菁芳, 韩晓日. 长期轮作和连作对白浆土中氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 185-187  
Tian X P, Xue J F, Han X R. Effects of long-term crop rotation and continuous cropping on nitrogen in albic soil [J]. *Journal of Soil and*

- Water Conservation*, 2007, 21(1): 185-187 (in Chinese)
- [23] Li W H, Liu Q Z, Chen P. Effect of long-term continuous cropping of strawberry on soil bacterial community structure and diversity [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(11): 2570-2582
- [24] Li W H, Liu Q Z. Changes in fungal community and diversity in strawberry rhizosphere soil after 12 years in the greenhouse[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(3): 677-687
- [25] 赵芸晨, 秦嘉海, 肖占文, 徐琳. 长期定点施肥对制种玉米土壤理化性状及重金属含量的影响[J]. 水土保持报, 2012, 26(6): 204-208  
Zhao Y C, Qin J H, Xiao Z W, Xu L. Effects of continuous cropping system of maize seed production on soil physical-chemical properties and content of heavy-metal in Hexi Corridor[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 204-208 (in Chinese)
- [26] 程红玉, 肖占文, 秦嘉海, 王瑞. 连作对玉米制种田土壤养分和土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2012, 45(4): 623-627  
Cheng H Y, Xiao Z W, Qin J H, Wang R. Effects of continuous cropping on soil nutrient and enzyme activities of corn-seed field soil[J]. *Soils*, 2013, 45(4): 623-627 (in Chinese)
- [27] 安宗胜, 詹婧, 孙庆业. 自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5958-5966  
An Z S, Zhan J, Sun Q Y. Changes of nitrogen components in wastelands of copper mine tailings with the formation of natural plant communities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5958-5966 (in Chinese)
- [28] 楚万林, 齐雁冰, 常庆瑞, 蒲洁. 秦巴山地县域土壤碱解氮空间变异与合理采样数的确定[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 141-146  
Chu W L, Qi Y B, Chang Q R, Pu J. County-scale spatial variability of soil available nitrogen distribution and determination of reasonable sampling density in Qinba Mountains [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 141-146 (in Chinese)
- [29] Kielland K, McFarland J W, Russel R W, Russel R W, Olson K. Rapid cycling organic of nitrogen in Taiga forest ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(3): 360-368
- [30] 李菊梅, 李生秀. 可矿化氮与各有机氮组分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 158-164  
Li J M, Li S X. Relation of mineralizable N to organic N components [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2003, 9(2): 158-164 (in Chinese)
- [31] Lv H J, He H B, Zhao J S, Zhang W, Xie H T, Hu G Q, Liu X, Wu Y Y, Zhang X D. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season [J]. *Plant and Soil*, 2013, 373 (1-2): 595-607
- [32] Stevenson F J. *Nitrogen in Agricultural Soils* [M]. Madison: American Society of Agronomy Incorporated, 1982
- [33] Stevenson F J. *Organic forms of Nitrogen* [M]. Madison: American Society of Agronomy Incorporated, 1982
- [34] 王岩, 蔡大同, 史瑞和. 肥料残留氮的有效性及其与形态分布的关系[J]. 土壤学报, 1991, 30(1): 19-25  
Wang Y, Cai D T, Shi R H. Availability of fertilizer residual-N and its relationship with distribution of residual N fractions [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 30(1): 19-25 (in Chinese)
- [35] Li J J, Xu Y B, Zhao J, Yin X H, Xu Z Y. Response of microbial diversity in soil under plastic shed to different years of continuous cropping [J/OL]. *Eurasian Soil Science*, (2022-09-09). DOI: 10.1134/S106422932110072
- [36] 彭三妹, 王博林, 徐建中, 丁志山, 袁小凤. 不同条件下连作杭白菊内生菌群的 T-RFLP 分析 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(24): 4763-4768  
Peng S M, Wang B L, Xu J Z, Ding Z S, Yuan X F. Effect of different treatment on endophytic bacterial communities in continuous cropping of *Chrysanthemum morifolium* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39(24): 4763-4768 (in Chinese)
- [37] Tian T, Sun B B, Shi H J, Gao T T, He Y H, Li Y, Liu Y X, Li X X, Zhang L Q, Li S D, Wang Q, Chai Y R. Sucrose triggers a novel signaling cascade promoting *Bacillus subtilis* rhizosphere colonization [J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(9): 2723-2737
- [38] Del Cerro P, Ayala-García P, Jiménez-Guerrero I, López-Baena F J, Vinardell J M, Megías M, Hungria M, Gil-Serrano A M, Pérez-Montano F, Ollero F J. The non-flavonoid inducible nodA3 and the flavonoid regulated nodA1 genes of *Rhizobium tropici* CIAT 899 guarantee nod factor production and nodulation of different host legumes [J]. *Plant and Soil*, 2019, 440(1-2): 185-200
- [39] 高游慧, 郑泽慧, 张越, 胡跃高, 王小芬. 根际微生态防治作物土传真菌病害的机制研究进展 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 100-113  
Gao Y H, Zheng Z H, Zhang Y, Hu Y G, Wang X F. Mechanism of rhizosphere micro-ecology in controlling soil-borne fungal diseases: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 100-113 (in Chinese)
- [40] Wang M, Ling N, Dong X, Zhu Y Y, Shen Q R, Guo S W. Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f sp cucumerinum [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 61: 153-161
- [41] 葛阳, 万修福, 王升, 康传志, 张文晋, 吕朝耕, 孙嘉惠, 郭兰萍. 氮肥对药用植物生态系统中土壤及三级营养关系的影响及机制 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8): 1893-1900  
Ge Y, Wan X F, Wang S, Kang C Z, Zhang W J, Lv C G, Sun J H, Guo L P. Effects and mechanisms of nitrogen fertilizers on soil and tritrophic interactions in Chinese medicinal plants ecosystem [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2021, 46(8): 1893-1900 (in Chinese)
- [42] Sören, T B. Linking soil biodiversity and agricultural soil management [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(5): 523-528
- [43] 王庆华, 付学松, 田叶韩, 高克祥, 申洋, 吕新民, 李洋. 致病性镰孢菌入侵对土壤微生物群落和功能的影响 [J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 56-62  
Wang Q H, Fu X S, Tian Y H, Gao K X, Shen Y, Lv X M, Li Y. Effects of invasion of pathogenic *Fusarium* invasion on soil microbial community and function [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(11): 56-62 (in Chinese)
- [44] Hiura K, Hattori T, Furusaka C. Bacteriological studies on the mineralization of organic nitrogen in paddy soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1976, 22(4): 459-465
- [45] 朱再标, 梁宗锁, 卫新荣, 舒志明, 王渭玲. 氮、磷、钾预防柴胡根腐病初步研究 [J]. 中药材, 2006, 29(10): 1005-1007  
Zhu Z B, Liang Z S, Wei X R, Shu Z M, Wang W L. Preliminary study on N, P, K fertilizer to control of root rot of *Bupleurum Chinese* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2006, 29(10): 1005-1007 (in Chinese)
- [46] Cao S, Li Y Z. Growth, sporulation, conidial germination and lethal temperature of *Paraphoma radicina*, A fungal pathogen of *Alfalfa* (*Medicago sativa*) root rot [J]. *Agriculture*, 2022, 12(9): 1501-1509
- [47] 陈昱君, 王勇, 冯光泉, 刘芸芝. 三七黑斑病病原生物学特性研究 [J]. 植物病理学报, 2005, 35(3): 267-269  
Chen Y J, Wang Y, Feng G Q, Liu Y Z. Biological characteristics of *Alternaria panax* Whetz isolated from *Panax notoginseng* [J]. *Acta*

- Phytopathologica Sinica*, 2005, (3): 267-269 (in Chinese)
- [48] Shi W C, Li M C, Wei G S, Tian R M, Li C P, Wang B, Lin R S, Shi C Y, Chi X L, Zhou B, Gao Z. The occurrence of potato common scab correlates with the community composition and function of the geocaulosphere soil microbiome[J]. *Microbiome*, 2019, 7(1): 14-24
- [49] 刘保财, 陈菁瑛, 张武君, 黄颖桢, 赵云青, 叶京. 福建太子参紫纹羽病病原鉴定及其生物学特性[J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(1): 45-51
- Liu B C, Chen J Y, Zhang W J, Huang Y Z, Zhao Y Q, Ye J. Identification and biological characteristics of violet root rot pathogen of *Pseudostellaria heterophylla* in Fujian Province [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(1): 45-51 (in Chinese)
- [50] 李晴晴, 霍莹莹, 杨静, 李甜甜, 徐福荣, 董鲜. 不同氮素形态配比对三七根腐病的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(4): 829-837
- Li Q Q, Huo Y Y, Yang J, Li T T, Xu F R, Dong X. Effect of different nitrogen forms on the prevention and control of *Panax notoginseng* root rot [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(4): 829-837 (in Chinese)
- [51] 杜建峰, 吴伟, 张晓英, 李洋, 丁新华. 番茄颈腐根腐病的发生及其防治研究进展[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(10): 200-206
- Du J F, Wu W, Zhang X Y, Li Y, Ding X H. Research progress on the occurrence and control of *Fusarium* crown and root rot of tomato [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(10): 200-206 (in Chinese)
- [52] 韩凤, 林茂祥, 章文伟, 李巧玲, 肖忠, 谭秋生, 杨毅, 李品明. 多花黄精根腐病对根际土壤酶活性及真菌群落变化的影响[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2021, 43(4): 53-61
- Han F, Lin M X, Zhang W W, Li Q L, Xiao Z, Tan Q S, Yang Y, Li P M. Effects of *Polygonatum cyrtoneura* root rot on rhizosphere soil enzyme activity and fungal community [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2021, 43(4): 53-61 (in Chinese)
- [53] 宋旭红, 谭均, 李隆云, 王钰, 伍晓丽. Illumina高通量测序揭示黄莲根腐根际土壤真菌群落组成及多样性[J]. *中草药*, 2018, 49(22): 5396-5403
- Song X H, Tan J, Li L Y, Wang Y, Wu X L. Illumina high-throughput sequencing reveals fungal community composition and diversity in root rot of *Coptis chinensis* in rhizosphere soil [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, 49(22): 5396-5403 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



**第一作者简介:** 甫文疆,西北农林科技大学硕士研究生,专业方向:土壤微生物。已在《植物营养与肥料学报》、*Scientific reports*、*Diversity*发表论文各1篇。曾主持河西学院科技创新项目1项,参与了国家自然科学基金项目(41867010)、甘肃省重点研发项目(22YF7NG128)的部分工作。



**通讯作者简介:** 赵芸晨,博士,河西学院农业与生态工程学院教授,兰州大学兼职硕士生导师,甘肃农业大学硕士生导师,中国土壤学会会员,农业部高级技能考评员。主要研究方向为土壤微生态与植物营养。主持或参与国家科技计划项目、国家科技部星火项目、国家农业部项目、国家自然科学基金项目、甘肃省委组织部陇原创新人才项目、甘肃省重点研发项目、甘肃省教育厅产业支撑项目、甘肃省科技支撑项目等课题项目10余项。部分研究结果发表于 *European Journal of Agronomy*、*Environmental Science and Pollution Research*、*Scientific Reports*、《水土保持学报》《植物营养与肥料学报》《土壤通报》《水土保持通报》《土壤》《干旱区农业研究》等期刊发表学术论文80余篇。