

山东省不同地区玉米内生真菌的群落组成和多样性分析

秦华伟 门兴元 卢增斌 李超 宋海燕 李丽莉*

(山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省植物病毒学重点实验室, 济南 250100)

摘要: 为探究山东省玉米内生真菌的资源分布、群落组成及多样性,采用叶片组织分离法对山东省52个市县的玉米内生真菌进行分离纯化,通过内转录间隔区(internal transcribed spacer, ITS)序列分析技术进行内生真菌的种属鉴定,并分析内生真菌的群落组成和多样性。结果表明,共分离到857株内生真菌,隶属25个属,其中链格孢属*Alternaria*的菌株数量最多,为583株,占总菌株数的68.03%,其次为镰刀菌属*Fusarium*有71株,占总菌株数的8.28%;大部分地区的优势属为链格孢属,少数地区的优势属为镰刀菌属、炭疽菌属*Colletotrichum*和弯孢属*Curvularia*。不同地区的内生真菌定殖率变化很大,在12.50%~100.00%之间,平均定殖率为76.15%;陵城的多样性指数和均匀度指数最高,分别为1.74和0.97;莱芜的丰富度指数最高为2.22。山东省玉米内生真菌可以分为5个类群,其中黄河流域地区内生真菌定殖率相对较高。表明山东省玉米内生真菌种类丰富,不同地区间多样性水平存在差异。

关键词: 玉米; 内生真菌; 群落结构; 多样性

Analysis of community structure and diversity of endophytic fungi in corn from different areas of Shandong Province

QIN Huawei MEN Xingyuan LU Zengbin LI Chao SONG Haiyan LI Lili*

(Key Laboratory for Plant Virology of Shandong, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong Province, China)

Abstract: To determine the distribution, community composition and diversity of endophytic fungi in corn plants in Shandong Province, corn leaves were collected from 52 regions in Shandong Province. The endophytic fungi were isolated and purified using the separation method of leaf tissue. The community composition and diversity of endophytic fungi were analyzed with internal transcribed spacer technique. The results showed that 857 strains in 25 genera were obtained. Among them, *Alternaria* was the most abundant with 583 strains, accounting for 68.03% of total strains, followed by *Fusarium* with 71 strains, accounting for 8.28% of total strains. *Alternaria* was dominant genus of endophytic fungi in most regions of Shandong Province, while *Fusarium*, *Colletotrichum* and *Curvularia* were dominant genus of endophytic fungi in several regions. There were significant differences in different areas of the colonization rate, the colonization rate of endophytic fungi varied from 12.50% to 100.00% and the average colonization rate was 76.15%. Diversity index and evenness index were the highest with values

of 1.74 and 0.97 in Lingcheng. The Margalef's index was the highest with value of 2.22 in Laiwu. Cluster analysis showed that the 52 geographic area could be classified into five groups, and the yellow river basin area had a higher colonization rate. The results indicated that the endophytic fungi from corn plants are abundant in Shandong Province and there were significant difference in the diversity in different regions.

Key words: corn; endophytic fungi; community structure; diversity

植物内生菌普遍存在于健康植物组织或器官内,主要包括内生细菌、内生真菌以及内生放线菌等,但不引发宿主植物表现出明显病害症状(石晶盈等,2006;姚领爱等,2010),并可通过自身的代谢产物或信号传导作用促进植物生长(韩梅等,2010;De Abreu et al., 2017)、增强宿主植物抗病虫能力(候美玲等,2012)、抗胁迫性(张文英等,2013)等。近年来,植物内生菌的经济价值和生态功能不断被揭示,作为一种新型的微生物资源,已经成为农业、林业领域的研究热点(Kaul et al., 2012; Shukla et al., 2014),同时也成了农业领域绿色防控技术的资源库(辜运富等,2008;候美玲等,2012)。植物内生真菌最早在禾本科植物中被发现,据不完全统计,目前全世界至少80个属290多种禾本科植物中发现有内生真菌(石晶盈等,2006)。

由于寄主植物、采样范围、取样部位的不同,植物中内生真菌多样性也不同。吴晓菡等(2012)从天目山山胡椒中分离获得到328株内生真菌;柴新义等(2016)从健康的青檀叶片获得839株内生真菌;崔文霞等(2017)从鱼腥草中分离得到隶属于19个属的3822株内生真菌;宋晓贺等(2019)在抗锈病小麦种子中内共分离到44个的属63种内生真菌,其中占优势的是格孢腔目;目前玉米内生菌的研究主要集中在内生细菌(候美玲等,2012;De Abreu et al., 2017),玉米根系内生细菌的主要种群为芽胞杆菌属 *Bacillus* sp., 芽胞杆菌具有防病促生的能力(高增贵等,2004;许艳蕊等,2016);刘洋等(2011)研究发现,玉米种子的基因型对内生细菌的群落结构有一定影响,后代与两亲本中内生细菌的优势属及其比例、群落结构差异较大,而两后代之间保持一致。禹乐乐(2012)开展了2个玉米品种整个生长期内生真菌的研究,共分离鉴定出15个属的内生真菌,其中优势属为青霉菌属 *Penicillium*、链格孢属 *Alternaria*、镰刀菌属 *Fusarium*, 研究结果还显示内生真菌群落具有一定的组织偏好性,玉米茎中内生真菌

的多样性最丰富。

目前对玉米内生真菌的多样性研究均在较小尺度范围内开展,缺乏较大空间下对不同生态区玉米内生真菌的系统性研究。因此,本研究以山东省52个市县的玉米为研究对象,对玉米叶片的内生真菌进行分离纯化,通过形态学和分子技术鉴定内生真菌种类,分析了不同地区玉米内生真菌的多样性和群落组成,明确山东省玉米内生真菌资源分布,探讨不同地区玉米内生真菌群落结构和多样性差异,以期筛选高效菌株、开发新的玉米内生菌资源奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试样品:2017年7月中下旬至8月底,此时正值玉米的小喇叭口期到大喇叭口期,自山东省安丘、茌平、岱岳、费县、胶南、东昌府、巨野、桓台等52个市县采集样品,每个地区选取1个采样点。每个采样点随机选取健康玉米10株,采后单独标记存放,低温保存,带回实验室后存放于4℃冰箱内待测,2d内完成内生真菌培养。

培养基:马铃薯葡萄糖(potato dextrose agar, PDA)培养基:新鲜马铃薯200g、葡萄糖20g、琼脂17g,蒸馏水1000mL,121℃高压灭菌20min,冷却至40℃,备用。

主要试剂和仪器:Ezup柱式真菌基因组DNA抽提试剂盒,生工生物工程(上海)股份有限公司;其它试剂均为国产分析纯。SW-CJ-2FD洁净工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;LDZM-80KCS立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;DYY-6D型电泳仪,北京六一仪器厂;2720热循环仪,美国Applied Biosystems公司;凝胶成像分析系统,美国Gene公司。

1.2 方法

1.2.1 内生真菌的分离和纯化

选取新鲜、健康玉米叶片用自来水清洗,用灭菌

吸水纸吸干叶片表面水分,室温晾干。在超净工作台上操作,用剪刀将玉米叶片剪成边长为2 cm的正方形小块,每株玉米随机选取2块,每地区10株玉米,参考禹乐乐(2012)的方法消毒,将玉米叶片放入75%酒精中浸泡30 s,然后转入1%的次氯酸钠溶液浸泡5 min,无菌水清洗3次,用无菌吸水纸吸干水分后将玉米叶片切成0.5 cm²的小块,随机选2块接种到PDA培养基上,参考禹乐乐(2012)的方法进行反复分离纯化,得到纯化内生真菌菌落。

1.2.2 内生真菌的内转录间隔区鉴定

采用内转录间隔区(internal transcribed spacer, ITS)序列分析技术进行种属鉴定。按照Ezup柱式真菌DNA提取试剂盒操作步骤提取内生真菌的总DNA,以ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')为引物,用真菌的DNA进行PCR扩增,引物均由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。25 μL PCR体系: Buffer I 2.5 μL、10 μmol/L上下游引物各1 μL、HiFi酶0.25 μL、DNA模板1 μL、dNTPs 2 μL、ddH₂O 17.25 μL。PCR反应条件:93℃预变性3 min,93℃变性45 s,57℃退火45 s,72℃延伸1.5 min,35个循环,72℃延伸10 min,4℃保存。将PCR扩增产物交由生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。用EditSeq和Chromas软件对序列进行分析,将获得的序列通过NCBI的BLAST程序与GenBank中的相似序列进行比对,使用MEGA 5进行系统进化树构建以分析其进化上的关系,获得分子鉴定结果。

1.2.3 内生真菌的数据处理与分析

采用定殖率评价玉米中内生真菌的定殖情况;采用相对分离率来比较分离某种内生真菌的优势度;采用多样性指数(H')指数分析内生真菌的群落生物多样性,采用均匀度指数(E)分析群落物种的均匀度,采用丰富度指数(R)分析群落物种的丰富程度。定殖率=样品中受内生真菌侵染的组织块数/全部样品组织块数 $\times 100\%$;相对频率=样品中分离到的某种内生真菌的菌株数/分离到的总菌株数 $\times 100\%$; $H' = -\sum_{i=1}^k P_i \cdot \ln P_i$,其中 k 为宿主体内内生真菌种类的总数, P_i 是指某种内生真菌的菌株数占全部内生真菌菌株总数的百分率; $E = H'/\ln S$,其中 H' 为多样性指数, S 为物种总数; $R = (S-1)/\ln N$,其中 S 为

宿主体内内生真菌种类的总数, N 为内生真菌菌株总数。内生真菌的群落结构采用非参数多变量的方法进行分析,首先对内生真菌数量进行四次方根转换,然后采用非加权组平均聚类分析方法(unweighted pair-group method with arithmetic, UPGMA)分析内生真菌的群落组成特征(Clarke et al., 2001)。

2 结果与分析

2.1 不同地区玉米内生真菌群落组成及定殖率

本研究从山东省52个市县玉米叶中共分离得到857株内生真菌,分别隶属于25个属,其中分离菌株个数最多的为链格孢属,共分离到583株菌株,占总菌株数的68.03%;其次为镰刀菌属,共分离到71株菌株,占总菌株数的8.28%;而小丛壳属*Glomerella*、须壳孢属*Ochrocladosporium*、稻瘟菌属*Magnaporthe*、节菱孢属*Arthrrium*、棒孢属*Coronopsis*和白僵菌属*Beauveria*,都只分离到1株菌株(图1)。

不同地区分离到内生真菌数量不同,其中岱岳地区分离到的内生真菌数量最多为58株,分别为链格孢属55株、毛球腔菌属*Setosphaeria* 1株、青霉菌属1株、曲霉属*Aspergillus* 1株,其次为东港地区共分离到50株,分别为链格孢属45株、弯孢属1株、附球菌属*Epicoccum* 4株。安丘、诸城、平阴和高青地区分离到的内生真菌数量均在5株以下,其中安丘只分离到链格孢属1株;诸城只分离到4株,分别是链格孢属3株、青霉菌属1株(图1)。

不同地区分离到内生真菌种类不同,其中无棣地区最多为7个属,分属于链格孢属、镰刀菌属、毛球腔菌属、弯孢属、间座壳属*Diaporthe*、小球腔菌属*Leptosphaeria*、突脐蠕孢属*Exserohilum*。有些地区只分离到1种内生真菌,如安丘、莱西、龙口、博兴、高青5个地区(图1)。

不同地区的玉米内生真菌定殖率在12.50%~100.00%之间,平均定殖率为76.15%。其中陵城、东港、岱岳、茌平、胶州、莱芜等22个地区的玉米内生真菌的定殖率都在90.00%以上,费县、栖霞和安丘地区的玉米内生真菌定殖率都在30.00%以下,安丘地区玉米内生真菌的定殖率最低为12.50%。其它27个地区的玉米内生真菌定殖率在37.50%~87.50%之间(图1)。黄河流域的郓城、东平、齐河、博兴等地区的内生真菌定殖率较高。

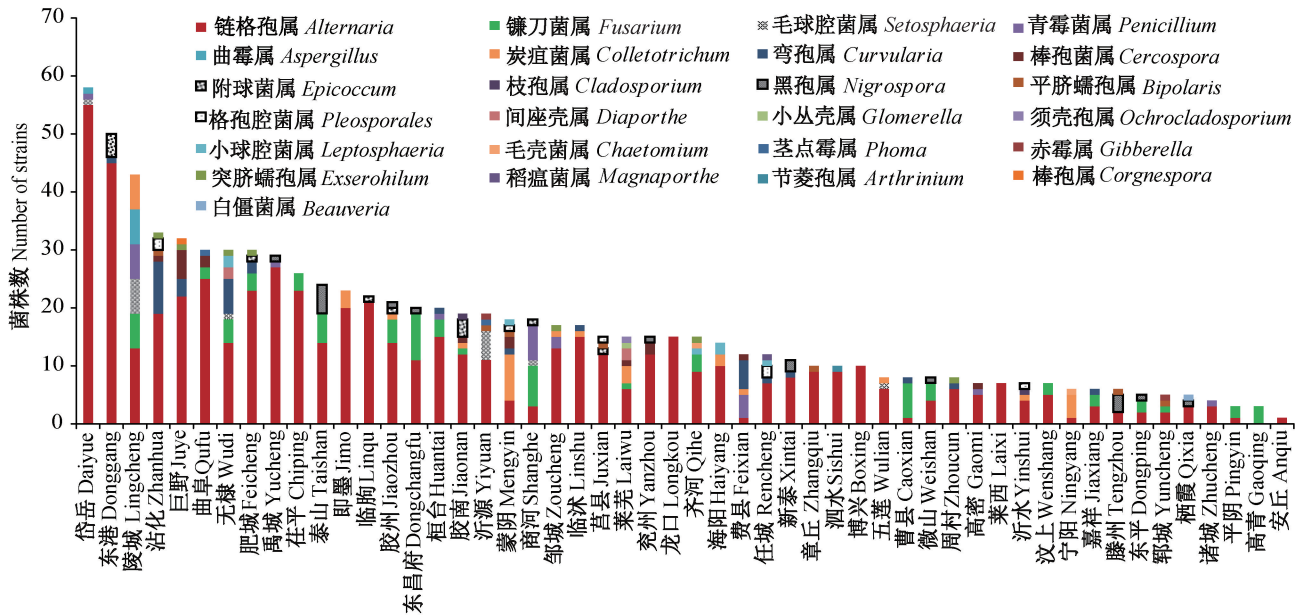


图1 山东省不同地区玉米叶片内生真菌的群落组成

Fig. 1 Community composition of endophytic fungi in corn leaves in different regions in Shandong Province

2.2 山东省不同地区玉米内生真菌优势种群分析

山东省不同地区玉米内生真菌的优势种群不同,大部分地区的优势属为链格孢属,相对频率大于30.23%;曹县、商河、平阴、高青等平原地区的玉米内生真菌优势属为镰刀菌属,相对频率在38.89%~

100.00%之间;丘陵地区费县的优势属为弯孢属,相对频率为41.67%,蒙阴和宁阳的优势属为炭疽菌属,相对频率分别为44.44%和66.67%;而东平的优势属为链格孢属和镰刀菌属,相对频率均为40.00% (图2)。

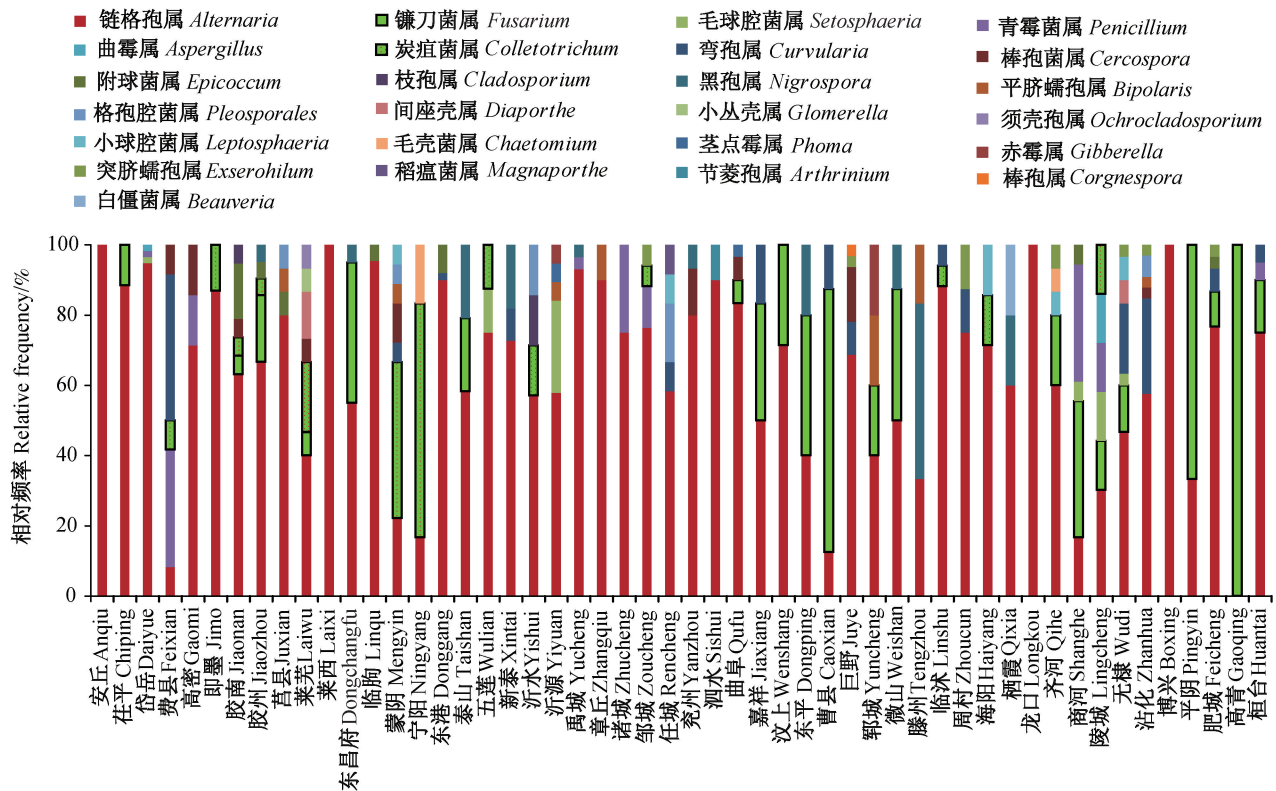


图2 山东省不同地区玉米内生真菌的相对频率

Fig. 2 Relative frequency of endophytic fungi in corn in different regions in Shandong Province

2.3 山东省不同地区玉米内生真菌多样性分析

山东省不同地区玉米内生真菌的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数存在一定差异,陵城的多样性指数和均匀度指数最高,分别为1.74和0.97;莱芜的

多样性指数为1.68,均匀度指数为0.86,丰富度指数最高为2.22;安丘、莱西、龙口、博兴、高青的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数最低,均为0;其它地区的多样性指数在0.18~1.58之间(表1)。

表1 山东省不同地区玉米内生真菌多样性分析
Table 1 Diversity analysis of endophytic fungi in corn in different regions in Shandong Province

地点 Location	多样性 指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Margalef index	地点 Location	多样性 指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Margalef index
陵城 Lingcheng	1.74	0.97	1.33	桓台 Huantai	0.80	0.58	1.00
莱芜 Laiwu	1.68	0.86	2.22	邹城 Zoucheng	0.79	0.57	1.06
蒙阴 Mengyin	1.58	0.81	2.08	新泰 Xintai	0.76	0.69	0.83
无棣 Wudi	1.53	0.79	1.76	五莲 Wulian	0.74	0.67	0.96
费县 Feixian	1.35	0.84	1.61	曹县 Caoxian	0.74	0.67	0.96
商河 Shanghe	1.35	0.84	1.38	周村 Zhoucun	0.74	0.67	0.96
郓城 Yuncheng	1.33	0.96	1.86	莒县 Juxian	0.72	0.52	1.11
任城 Rencheng	1.23	0.77	1.61	平阴 Pingyin	0.64	0.92	0.91
胶南 Jiaonan	1.20	0.67	1.70	兖州 Yanzhou	0.63	0.57	0.74
齐河 Qihe	1.17	0.73	1.48	曲阜 Qufu	0.63	0.45	0.88
沾化 Zhanhua	1.16	0.65	1.43	汶上 Wenshang	0.60	0.86	0.51
沂水 Yinshui	1.15	0.83	1.54	诸城 Zhucheng	0.56	0.81	0.72
沂源 Yiyuan	1.13	0.70	1.36	临沭 Linshu	0.44	0.40	0.71
东平 Dongping	1.05	0.96	1.24	即墨 Jimo	0.39	0.56	0.32
胶州 Jiaozhou	1.02	0.63	1.31	东港 Donggang	0.38	0.34	0.51
嘉祥 Jiaxiang	1.01	0.92	1.12	茌平 Chiping	0.36	0.52	0.31
滕州 Tengzhou	1.01	0.92	1.12	章丘 Zhangqiu	0.33	0.47	0.43
巨野 Juye	0.99	0.61	1.15	泗水 Sishui	0.33	0.47	0.43
泰山 Taishan	0.97	0.88	0.63	禹城 Yucheng	0.30	0.27	0.59
微山 Huishan	0.97	0.89	0.96	岱岳 Daiyue	0.26	0.19	0.74
栖霞 Qixia	0.95	0.86	1.24	临朐 Linqu	0.18	0.27	0.32
宁阳 Ningyang	0.87	0.79	1.12	莱西 Laixi	0.00	—	0.00
东昌府 Dongchangfu	0.85	0.77	0.67	龙口 Longkou	0.00	—	0.00
肥城 Feicheng	0.84	0.52	1.18	博兴 Boxing	0.00	—	0.00
高密 Gaomi	0.80	0.72	1.03	高青 Gaoqing	0.00	—	0.00
海阳 Haiyang	0.80	0.72	0.76	安丘 Anqiu	0.00	—	—

2.4 山东省不同地区玉米内生真菌聚类分析

根据各地区内生真菌的群落组成进行聚类分析,可以将山东省玉米内生真菌分为5个大类群(图3),沂源和郓城为第1个类群;蒙阴、任城、齐河、无棣、巨野、沾化、周村、肥城为第2个类群;岱岳区、商河、陵城、费县、高密、诸城为第3个类群;莱芜、胶南、曲阜、高青、胶州、东平、微山、东昌府、泰山、茌

平、汶上、平阴、桓台、嘉祥、曹县是第4个类群;宁阳、沂水、邹城、五莲、海阳、即墨、临沭、新泰、禹城、兖州、栖霞、莒县、临朐、东港、安丘、泗水、章丘、龙口、莱西、博兴是第5个类群。其中第4个类群主要集中在鲁西南地区,第5个类群主要集中在鲁东、鲁中、鲁南地区,其它群落在地域分布上较为分散,地域性不显著。

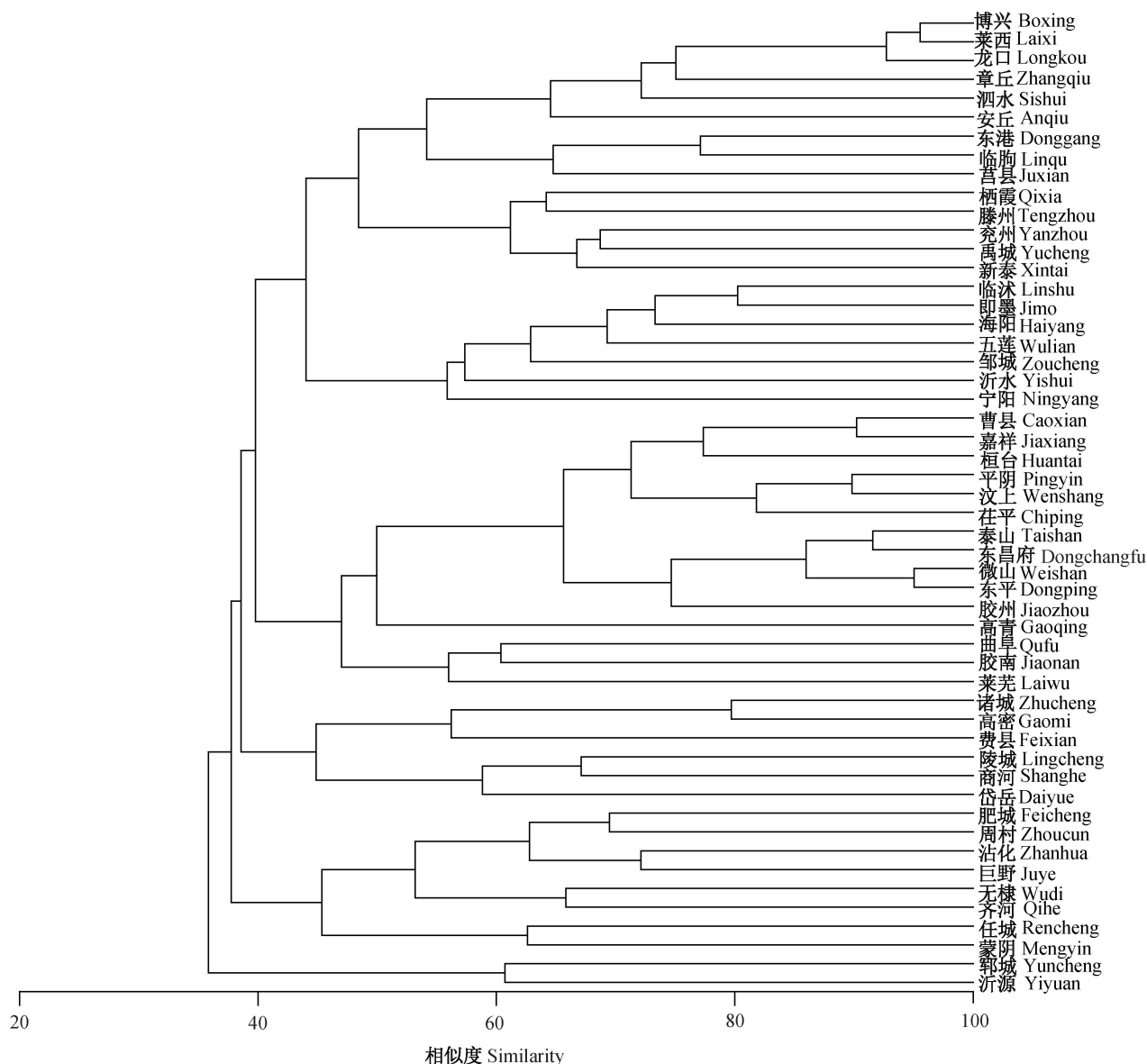


图3 山东省不同地区玉米内生真菌站位的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of endophytic fungi in corn from different regions in Shandong Province

3 讨论

对山东省玉米种植区系统取样调查结果显示,内生真菌在玉米中普遍存在,52个市县的玉米叶片中均分离到内生真菌,共25个属857株菌株。不同地区分离出内生真菌数量不同,岱岳分离最多,获得58株,而安丘最少,只获得1株,不同地区分离获得的内生真菌种类也不同,最多的地区有7个属,而最少的只分离到1种内生真菌。玉米内生真菌定殖率在不同地区间有较大的差异,山东省平均定殖率为76.15%,定殖率最高地区达100.00%,最低仅为12.50%,而且研究发现发现黄河流域经过的郯城、东平、齐河、博兴等地区玉米叶片内生真菌定殖率相对较高,这对于玉米内生菌资源的获取及应用具有

重要的指导作用。从研究结果来看,山东省玉米内生真菌的优势属为链格孢属,在采样调查的52个市县中,51个市县分离出了链格孢属,这与禹乐乐(2012)对2个玉米品种整个生育期内生真菌优势属的研究结论基本一致,与苗文莉(2011)和崔文霞等(2017)报道的链格孢属是暖温带植物常见优势属的结论相似,小麦、鱼腥草内生真菌的优势属也是链格孢属,说明链格孢属具有较强的环境适应性和寄主适应性,是我国的大部分地区禾本科植物的优势内生真菌,应用时应重视。还有一些内生真菌具有明显的地域分布,小丛壳属、须壳孢属、稻瘟菌属、节菱孢属、棒孢属和白僵菌属都仅分离到1株,只在1个地区出现。

多样性指数代表了各地内生真菌群落的多样性,其受种类的数量即丰富度的影响,也会被种类的个体分配的均匀度所影响。从研究结果来看,山东省不同地区的玉米内生真菌的多样性指数存在一定的差异,岱岳的内生真菌数量最多,但因其种类的不均衡,多样性指数并不是最高的,而陵城的因其均匀度指数(0.97)和丰富度指数(1.33)均较高,多样性指数最高(1.74),说明陵城玉米内生真菌生物多样性最丰富。而安丘、莱西、龙口、博兴、高青的内生真菌只有1个属,多样性指数为0,这种差异可能是由其生境中的土壤肥沃程度、空气湿度、温度、光照、降水、植被、植物自身的状况以及人为因素所引起的(Hoffman & Arnold, 2008; 柴新义等, 2016)。聚类分析法将52个市县的玉米内生真菌分为5大类群,各类没有明显的地域分布。

由于内生菌在农业领域具有较大的应用潜力,近年来引起越来越多的研究者关注,除了内生菌功能的验证,目前在明确内生菌的调控机制,获得拮抗活性调控的关键基因(吴文娜等, 2019),抗菌活性物质的分离上(赵莹等, 2018)也开展了相应的研究,以期能为内生菌的生产应用提供新的思路。有研究表明,镰刀菌属、炭疽菌属可以提高小麦对干旱性的抵抗能力(潘文文, 2016);球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 定殖玉米植株后,可通过自身的代谢产物或诱导植物产生的次生代谢物质,抑制玉米螟幼虫的生长发育(袁盛勇等, 2011; 王冰, 2014)。本研究中也分离到获得了镰刀菌属、炭疽菌属和白僵菌属,下一步将开展其对提高寄主抗胁迫、抗虫能力的研究。本研究还分离获得具有抗虫性的黑孢霉属内生真菌(Thakur et al., 2013)和具有秸秆降解能力的拟茎点霉属(陈晏等, 2010),对其功能的研究也是下一步研究重点,以期能为玉米抗病虫提供新的技术手段和数据支撑。

参 考 文 献 (References)

- CHAI XY, CHAI GQ, XIANG YY, ZHANG WW, YIN PF. 2016. Composition and ecological distribution of endophytic and epiphytic fungi from the foliage of *Pteroceltis tatarinowii*. *Acta Ecologica Sinica*, 36(16): 5163–5172 (in Chinese) [柴新义, 柴钢青, 向玉勇, 张微微, 殷培峰. 2016. 青檀叶片内生和附生真菌组成及生态分布. *生态学报*, 36(16): 5163–5172]
- CHEN Y, DAI CC, WANG XX, ZHANG B, JU Q. 2010. Effects of endophytic fungus (*Phomopsis* sp.) on decomposition of plant (*Atractylodes lancea* (Thunb) DC) litters and activity of degrading enzymes in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 47(3): 537–544 (in Chinese) [陈晏, 戴传超, 王兴祥, 张波, 鞠群. 2010. 施加内生真菌拟茎点霉 (*Phomopsis* sp.) 对茅苍术凋落物降解及土壤降解酶活性的影响. *土壤学报*, 47(3): 537–544]
- Clarke KR, Gorley RN, Somerfield PJ, Warwick RM. 2001. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation and interpretation. 2nd edition. Plymouth, UK: Primer-E Ltd
- CUI WX, CHEN R, ZHANG FH, CUI ZH, LI QF. 2017. Diversity of endophytic fungi in *Houttuynia cordata* Thumb. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 26(10): 1513–1519 (in Chinese) [崔文霞, 陈睿, 张峰华, 崔忠华, 李勤凡. 2017. 鱼腥草内生真菌多样性分析. *西北农业学报*, 26(10): 1513–1519]
- DE ABREU CS, FIGUEIREDO JEF, OLIVEIRA CA, DOS SANTOS VL, GOMES EA, RIBEIRO VP, DE ALMEIDA BARROS B, DE PAULA LANAUG, MARRIEL I. 2017. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. *Genetics and Molecular Research*, 16(1): 16019294
- GAO ZG, ZHUANG JH, CHEN J, LIU X, TANG SG. 2004. Population of endophytic bacteria in maize roots and its dynamic analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(8): 1344–1348 (in Chinese) [高增贵, 庄敬华, 陈捷, 刘限, 唐树戈. 2004. 玉米根系内生细菌种群及动态分析. *应用生态学报*, 15(8): 1344–1348]
- GU YF, Z YF, ZHANG XP. 2008. Preliminary research on the flora of endophytic bacteria and selection of useful endophytic bacteria in the seedling of maize. *Microbiology China*, 35(7): 1028–1033 (in Chinese) [辜运富, 张云飞, 张小平. 2008. 玉米苗期内生细菌的种群初探及有益内生细菌的筛选. *微生物学通报*, 35(7): 1028–1033]
- HAN M, LUO PY, XIAO YN, NIU XG, HAN XR. 2010. Isolation of endophytic N₂-fixing bacteria of corn rice and their function for promoting growth. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 41(1): 94–97 (in Chinese) [韩梅, 罗培宇, 肖亦农, 钮旭光, 韩晓日. 2010. 玉米内生固氮菌的分离鉴定及其促生长作用研究. *沈阳农业大学学报*, 41(1): 94–97]
- HOFFMAN MT, ARNOLD AE. 2008. Geographic locality and host identity shape fungal endophyte communities in cupressaceous trees. *Mycological Research*, 112(3): 331–344
- HOU ML, XIN YY, HAO ZM, CAO ZY, SHEN S, ZHANG SR, DONG JG. 2012. Antifungal activity substance of endogeny *Bacillus* in maize (*Zea mays*) and mechanisms against *Setosphaeria turcica*. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 20(9): 1018–1027 (in Chinese) [侯美玲, 辛媛媛, 郝志敏, 曹志艳, 申坤, 张韶茹, 董金皋. 2012. 玉米内生芽胞杆菌的抗菌活性物质及其拮抗玉米大斑病菌机理的初步研究. *农业生物技术学报*, 20(9): 1018–1027]
- KAUL S, GUPTA S, AHMED M, DHAR MK. 2012. Endophytic fungi from medicinal plants: a treasure hunt for bioactive metabolites. *Phytochemistry Reviews*, 11(4): 487–505
- LIU Y, ZUO S, ZOU YY, WANG JH, SONG W. 2011. Diversity of endophytic bacterial communities in seeds of hybrid maize (*Zea mays* L., Nongda108) and their parental lines. *Scientia Agricultura Sinica*, 44(23): 4763–4771 (in Chinese) [刘洋, 左山, 邹媛媛, 王

- 建华, 宋未. 2011. 杂交玉米农大 108 及其亲本种子内生细菌群落的多样性. 中国农业科学, 44(23): 4763–4771]
- MIAO WL. 2012. Diversity of endophytic fungi in wheat (*Triticum aestivum* L.) and their relationship with the host. Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University (in Chinese) [苗文莉. 2011. 小麦内生真菌多样性及其与宿主关系研究. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学]
- PAN WW. 2016. Endophytic mycoflora of *Selaginella*: diversity patterns and effect on drought tolerance in wheat. Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University (in Chinese) [潘文文. 2016. 卷柏内生真菌多样性及其对小麦抗旱性的影响. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学]
- SHI JY, CHEN WX, LIU AY. 2006. Advances in the study of endophytes and their effects on control of plant diseases. Acta Ecologica Sinica, 26(7): 2395–2401 (in Chinese) [石晶盈, 陈维信, 刘爱媛. 2006. 植物内生菌及其防治植物病害的研究进展. 生态学报, 26(7): 2395–2401]
- SHUKLA ST, HABBU PV, KULKARNI VH, JAGADISH KS, PANDEY AR, SUTARIYA VN. 2014. Endophytic microbes: a novel source for biologically/pharmacologically active secondary metabolites. Asian Journal of Pharmacology and Toxicology, 2(3): 1–16
- SONG XH, LI YK, LI Q. 2019. Diversity of endophytic fungi in the seeds of three wheat cultivars resistant to stripe rust. Journal of Plant Protection, 46(4): 927–928 (in Chinese) [宋晓贺, 李彦凯, 李强. 2019. 三个不同抗条锈病小麦品种种子内生真菌多样性分析. 植物保护学报, 46(4): 927–928]
- THAKUR A, KAUR S, KAUR A, SINGH V. 2013. Enhanced resistance to *Spodoptera litura* in endophyte infected cauliflower plants. Environmental Entomology, 42(2): 240–246
- WANG B. 2014. Study on the pathogenicity of different matting type *Beauveria bassiana* strains and their colonization in the field. Master Thesis. Harbin: Harbin Normal University (in Chinese) [王冰. 2014. 球孢白僵菌不同交配型菌株致病机理与田间生态定殖研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学]
- WU WN, ZHAO Y, WANG HM, CHEN YY, HAO ZM, DONG JG. 2019. Establishment and analysis of the transposon mutant library of maize endophytic YY1 strain. Journal of Plant Protection, 46(2): 489–490 (in Chinese) [吴文娜, 赵莹, 王会敏, 陈瑶瑶, 郝志敏, 董金皋. 2019. 玉米内生菌 YY1 转座子突变体库的创制及分析. 植物保护学报, 46(2): 489–490]
- WU XH, LI WC, QIN LP. 2012. Analyses on composition and diversity of endophytic fungi in different parts of *Lindera glauca* from Tianmu Mountain. Journal of Plant Resources and Environment, 21(2): 107–113 (in Chinese) [吴晓茜, 李文超, 秦路平. 2012. 天目山胡椒不同部位内生真菌组成及多样性分析. 植物资源与环境学报, 21(2): 107–113]
- XU YR, FANG ZJ, LU XP, MU CH, FAN QP, HAO LJ. 2016. Isolation and identification of endophytic bacteria from roots of four inbred lines in maize. Crops, (4): 112–117 (in Chinese) [许艳蕊, 方志军, 卢晓平, 穆春华, 范秋苹, 郝鲁江. 2016. 四个玉米自交系根系内生细菌的分离和鉴定. 作物杂志, (4): 112–117]
- YAO LA, HU ZB, WANG LL, ZHOU JY, LI WK. 2010. Research development of the relationship between plant endophyte and host. Ecology and Environmental Sciences, 19(7): 1750–1754 (in Chinese) [姚领爱, 胡之璧, 王莉莉, 周吉燕, 黎万奎. 2010. 植物内生菌与宿主关系研究进展. 生态环境学报, 19(7): 1750–1754]
- YU LL. 2012. Diversity of endophytic fungi in maize (*Zea mays* L.) and their relationship with the host. Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University (in Chinese) [禹乐乐. 2012. 玉米内生真菌多样性及其与宿主关系研究. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学]
- YUAN SY, KONG Q, CHEN B, XUE CL, TIAN XJ, XIAO C, LI ZY. 2011. Study on virulence of *Beauveria bassiana* MZ050724 to larvae of *Ostrinia furnacalis*. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 24(2): 608–611 (in Chinese) [袁盛勇, 孔琼, 陈斌, 薛春丽, 田学军, 肖春, 李正跃. 2011. 球孢白僵菌 MZ050724 对亚洲玉米螟幼虫毒力研究. 西北农业学报, 24(2): 608–611]
- ZHANG WY, HAO RC, WANG AA, YANG T, RALF O. 2013. Conferring drought tolerance in maize seedling by endophytic fungus *Piriformospora indica*. Journal of Maize Sciences, 21(5): 127–130 (in Chinese) [张文英, 蒿若超, 汪媛媛, 杨婷, RALF O. 2013. 内生真菌印度梨形孢诱导提高玉米苗期抗旱性研究初探. 玉米科学, 21(5): 127–130]
- ZHAO Y, XU YD, HOU ML, SHEN S, HAO ZM, DONG JG. 2018. The separation of lipopeptides from endophytic strain YY1 in maize using high-speed. Journal of Plant Protection, 45(6): 1425–1426 (in Chinese) [赵莹, 徐雅迪, 候美玲, 申琬, 郝志敏, 董金皋. 2018. 高速逆流色谱法分离玉米内生菌 YY1 菌株脂肽类抗菌物质. 植物保护学报, 45(6): 1425–1426]

(责任编辑: 王 璇)