植物营养与肥料学报 2012,18(4):907-914
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄顶菊入侵对土壤微生物、土壤酶活性及土壤养分的影响

杨 星[1], 张利辉[1], 郑 超[2], 张金林[1], 韩建民[1*], 董金皋[1*]
(1 河北农业大学生命科学学院真菌毒素与植物分子病理学实验室,河北保定 071001;
2 河北大学生命科学学院分子免疫实验室,河北保定 071001)

摘要:通过采样分析,研究了外来植物黄顶菊入侵对非耕地和耕地,以及对玉米根系土壤微生物、土壤酶活性、土壤速效养分的影响,旨在揭示黄顶菊入侵农田和贫瘠荒地的机制。本试验比较了距根系不同距离土壤的微生态变化;分析了根系土壤3大微生物类群结构、5种土壤理化性质以及5种土壤酶活性之间的相关性。结果表明,非耕地黄顶菊根表土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量分别为对照的4.44、6.88、2.64倍,耕地土壤中分别为对照的5.31、13.78、7.56倍;非耕地黄顶菊根表土壤细菌、真菌、放线菌数量分别为对照的13.23、6.67、21.40倍,耕地中分别为对照的9.27、2.15、2.24倍,可见黄顶菊对非耕地土壤中可培养的细菌、真菌、放线菌数量的影响更为明显;非耕地中黄顶菊根表土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶的活性分别为对照的19.44、5.39、1.64、1.74、4.62倍,说明细菌非常活跃,耕地中分别为对照的2.26、3.45、1.53、0.95、4.89倍。另外在玉米与黄顶菊互作时,其根表土壤速效氮、磷、钾分别为非互作条件下的63.54%、64.70%、80.71%,黄顶菊入侵明显降低了玉米根表速效养分。综上,黄顶菊入侵增加了其根系周围可培养土壤微生物数量、土壤酶活性及土壤速效养分含量,降低了附近玉米根表土壤中可培养微生物数量、土壤酶活性和速效养分含量。

关键词:外来入侵植物;黄顶菊;土壤速效养分;土壤微生物;土壤酶活性
中图分类号:S154　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)04-0907-08

Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil microbial communities, enzyme activities and nutrients

YANG Xing[1], ZHANG Li-hui[1], ZHENG Chao[2], ZHANG Jin-lin[1], HAN Jian-min[1*], Dong Jin-gao[1*]
(*1 Mycotoxin and Molecular Plant Pathology Laboratory, College of Life Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China;*
2 Molecular Immunology laboratory, College of Life Science, Hebei University, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: Through the analysis of sampling, the effects of exotic species *Flaveria bidentis* invasion on soil microbial communities, enzyme activities and nutrients around their roots in non-cultivated land and cultivated land and around maize roots were studied in order to reveal the mechanism of *Flaveria bidentis* invading farmland and barren land successfully. Our experiment analyzed the cultivable soil microbe populations, soil available nutrients and soil enzyme activities around the roots in both non-cultivated land and cultivated land when *Flaveria bidentis* invaded. In *Flaveria bidentis* root surface in the non-cultivated land and cultivated land, the contents of available N, P and K are 4.44, 6.88 and 2.64, and 5.31, 13.78 and 7.56 times as those in the nude land (CK) respectively. The numbers of cultivable bacteria, fungi and actinomycetes in root surface are 13.23, 6.67 and 21.40, and 9.27, 2.15 and 2.24 times as those in the nude land respectively. The alkaline phosphatase, acid phosphatase, urase, dehydrogenase, invertase activities are 19.44, 5.39, 1.64, 1.74 and 4.62, and 2.26, 3.45, 1.53, 0.95 and

收稿日期:2011-12-31　　**接受日期**:2012-03-06
基金项目:国家"863"计划"新型生物源除草剂的创新理论及应用"(2006AA219A4)项目资助。
作者简介:杨星(1986—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事农作物抗病生理方面的研究。E-mail:yangxing86@163.com
*通讯作者 Tel:0312-7528142, E-mail:hanjianmin64@tom.com; Tel:0312-7528266, E-mail:dongjingao@126.com

4.89 times as those in the nude land respectively which can indicate that bacteria are so active. In soil of maize root surface, the contents of available N, P, K, nutrients at non-interactional root surface are 63.54%, 64.70% and 80.71% of that at interactional root surface. The above-mentioned results suggest that the root secretion of *Flaveria bidentis* increases the quantity of cultivable soil microbe groups, soil enzyme activities and available nutrients contents around their roots, reduces the quantity of cultivable soil microbe groups, soil enzyme activities and available nutrients contents around maize roots growing nearby under the natural environment, which may be one of main factors making *Flaveria bidentis* invading farmland and barren land successfully.

Key words: exotic plant; *Flaveria bidentis*; available nutrient; cultivable soil microbe group; enzyme activity

外来植物黄顶菊(*Flaveria bidentis*)自2001年首次在中国发现后,扩展迅速,已列入河北省检疫性有害生物。黄顶菊耐盐碱和干旱,喜生于荒地,在贫瘠的建筑垃圾或砖石瓦块横生的荒郊生长良好,随着入侵程度的加深,一些本土植物如狗尾草、马唐等的数量逐渐减少,甚至完全消失,对农业和自然生态环境构成严重威胁。有研究报道,黄顶菊的叶片为全栅型、等面叶,具有C4植物叶片解剖结构和光合特点[1];商闫等研究发现,生长在黄顶菊附近的玉米其生长会受到抑制,根系活力明显降低[2],认为黄顶菊可能通过根系分泌物对玉米产生影响。另外,入侵植物根系分泌物(无机离子、有机物、活性物质等)可能改变根际周围土壤微生物种群结构,影响土壤氮、磷、钾等养分的转化与供应,进而影响植物生长[3-6]。研究发现能与AM真菌形成良好的丛枝菌根共生体,增强了其对土壤水分和矿质营养的利用能力[7]。当然,入侵植物根系分泌物本身也可能促进土壤矿物中氮、磷、钾等元素的释放,以上原因均可能与黄顶菊耐贫瘠能力有关。本文通过研究入侵区域黄顶菊根系周围土壤中微生物、酶活性、速效养分的变化及黄顶菊对附近玉米根系周围土壤微生物、酶活性及速效养分的影响,分析了这三类指标间的关系,为揭示黄顶菊耐贫瘠,影响附近植物生长的生理机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 采样地概况与采样方法

采样地位于河北省邢台隆尧县山口镇,海拔高度在25～157 m,全县年平均气温12.8℃,年平均降水量524 mm,日平均光照7.6 h,全年无霜期195 d。属温带大陆性季风气候,半干旱地。冬季寒冷少雪,夏季炎热多雨,春季干燥,秋季气温明显下降,降水日数日趋减少。主要土壤类型为褐土,土壤肥沃,适宜农作物种植。

2010年10月初,在上述采样地采取根系土,采样地块为4种类型,分别为非耕地黄顶菊、耕地黄顶菊、与黄顶菊非互作的玉米、与黄顶菊互作的玉米。采样地区黄顶菊在耕地与非耕地均有明显的入侵,其中黄顶菊入侵耕地时覆盖了整片农田,零星长有本地杂草。入侵非耕地时表现出极其明显的群落优势,零星长有本地杂草。在黄顶菊(耕地)与玉米(耕地)毗邻互作区(黄顶菊与玉米相距约为30 cm),观察到玉米植株长势明显低于非毗邻互作的玉米植株,并且玉米果实变小,籽粒少。采样地范围集中,因而可排除地区差异。在采样地各选定7株生长健壮,无病虫害的黄顶菊及玉米,去除地面植被和地表凋落物后将植株连根带土挖出。采用土壤抖落法[8],轻轻抖动脱落下的土壤作为根周土壤,需用力抖动才会掉下的土壤作为根际土壤,最后仍紧紧粘附于根系上的土壤用刷子刷落作为根表土壤。另外,在取样地周围分别觅7块1 m×1 m规格的裸地,清除地面植物和凋落物,用土钻沿对角线随机采取5—10 cm土层土壤,每个样点取12钻混合为一个土样作为对照。

在试验前,分别将收集到的15份土样(即耕地黄顶菊根表、根际、根周、裸地对照;非耕地黄顶菊根表、根际、根周、裸地对照;与黄顶菊互作的玉米根表、根际、根周;与黄顶菊非互作的玉米根表、根际、根周以及玉米田对照,每个均取3个重复)充分混匀。将采集的土壤样品分成两份,一份阴凉干燥处风干,研磨。部分过0.85 mm筛室温保存用于测定速效养分,部分过0.15mm筛室温保存用于测定有机质含量;第二份新鲜土样立即存放于4℃冰箱,用于微生物的培养及pH测定。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 土壤养分的测定[9] 有机质的测定采用重铬酸钾容量法;速效氮采用KCI浸提—靛酚兰比色法;速效磷采用钼锑抗比色法;速效钾采用原子吸收分光光度计法;pH值采用电位法测定。

1.2.2 可培养微生物类群的测定 采用稀释平板涂

布法分离土壤中的细菌、真菌和放线菌,并对其菌落进行计数,培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和改良高氏一号培养基。

1.2.3 土壤酶活性测定[10]　脲酶活性用靛酚蓝比色法测定,酶活性以 1 d 后每克风干土中 NH_3-N 的生成量[NH_3-N mg/(g·d)]表示;磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以 1 h 后每克新鲜土中对-硝基酚的生成量[$C_6H_5NO_3$ μg/(g·h)]表示;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以 1 d 后每克风干土中的葡萄糖量[Glucose mg/(g·d)]表示;脱氢酶采用氯化三苯基四氮唑法,酶活性以 1 d 后每克风干土中 TTC 的还原产物 TPF 的生成量[TPF μg/(g·d)]表示。

1.3 统计分析

应用 SPSS 17.0 统计软件,对土壤速效养分、酶活性、可培养微生物数量作单因子方差分析(One-Way ANOVA: Fisher's LSD test),所有数据均为平均值 ± SE,再对 3 组数据作相关性分析(Pearson 2-tailed test)。

2 结果与分析

2.1 黄顶菊入侵对土壤养分、微生物和酶活性的影响

2.1.1 对土壤中速效养分含量的影响　研究表明,无论是耕地还是非耕地,黄顶菊根系周围土壤速效养分的含量均显著高于裸地对照($P<0.05$)。非耕地中,根表土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量分别是对照的 4.44、6.88、2.64 倍;根表土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量显著高于根际和根周土壤($P<0.05$)。耕地中,根表土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量分别是裸地对照的 5.31、13.78、7.56 倍。根表土壤养分含量(速效磷除外)也显著高于根际和根周土壤($P<0.05$)。非耕地中黄顶菊根系周围土壤有机质含量显著高于裸地对照($P<0.05$)。无论是耕地还是非耕地,黄顶菊根表土壤 pH 值明显低于裸地对照(表 1),可能是根系呼吸及分泌有机酸所致。

表 1　黄顶菊入侵对土壤速效养分含量的影响

Table 1　Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrient contents

土样来源 Source of soil sample		有机质 Organic matter (g/kg)	速效氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
非耕地 Non-cultivated land	根表 Root surface	35.73 ± 0.31 a	92.19 ± 0.44 a	16.80 ± 0.12 b	539.30 ± 2.30 a	8.05 ± 0.03 d
	根际 Rhizosphere	35.58 ± 0.03 a	70.13 ± 0.00 c	5.31 ± 0.12 f	484.04 ± 2.30 b	8.24 ± 0.00 b
	根周 Root zone	35.21 ± 0.06 a	73.22 ± 0.44 b	6.87 ± 0.32 e	470.22 ± 2.30 c	8.27 ± 0.01 b
	裸地对照 Control Ⅰ	34.57 ± 0.17 b	20.73 ± 0.88 g	2.44 ± 0.12 g	204.06 ± 0.69 e	8.76 ± 0.03 a
耕地 Cultivated land	根表 Root surface	31.32 ± 0.39 d	67.92 ± 0.88 d	12.26 ± 0.12 c	405.75 ± 2.30 d	8.03 ± 0.02 d
	根际 Rhizosphere	22.61 ± 0.14 e	28.67 ± 0.44 f	10.22 ± 0.21 d	132.22 ± 0.80 f	8.00 ± 0.06 d
	根周 Root zone	32.67 ± 0.03 c	33.64 ± 0.44 e	19.67 ± 0.12 a	205.68 ± 2.20 e	8.24 ± 0.03 bc
	裸地对照 Control Ⅱ	32.45 ± 0.05 c	12.79 ± 0.44 h	0.89 ± 0.00 h	53.70 ± 0.61 g	8.17 ± 0.01 c

注(Note):表中数值为平均数 ± 标准误,同一列数据后不同字母表示在 5% 水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

2.1.2 对土壤中可培养微生物的影响　由表 2 可知,非耕地(裸地对照)土壤中可培养细菌、真菌和放线菌数量显著低于耕地(裸地对照)($P<0.05$)。非耕地与耕地中黄顶菊根系周围土壤可培养细菌、真菌、放线菌数量显著高于裸地对照,并且距离根系越近,菌的数量越多。非耕地中黄顶菊根表土壤细菌、真菌、放线菌数量分别是对照的 13.23、6.67、21.40 倍,耕地中黄顶菊根表土壤三类菌的数量分别是对照的 2.15、2.24、9.27 倍;通过根表与裸地对照的倍数关系,可看出对非耕地中菌类数量的提升更为明显。在非耕地与耕地中,通过对比根周与对照两组土壤菌类数量,耕地中,细菌数量差异缩小,真菌数量没有差异,放线菌数量甚至裸地对照大于根周,推测根系微生物的影响范围大致会蔓延

表2 黄顶菊入侵对土壤中可培养微生物的影响

Table 2 Effects of *Flaveria bidentis* invasion on the quantity of cultivable soil microbe groups

土样来源 Source of soil sample		细菌 Bacteria ($\times 10^7$ cfu/g)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ cfu/g)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^4$ cfu/g)
非耕地 Non-cultivated land	根表 Root surface	35.33 ±0.88 c	26.67 ±0.67 b	121.33 ±1.86 b
	根际 Rhizosphere	15.67 ±0.33 f	12.67 ±0.33 c	97.33 ±0.67 c
	根周 Root zone	11.67 ±0.88 g	9.33 ±0.33 d	82.33 ±0.67 d
	裸地对照 Control Ⅰ	2.67 ±0.67 h	4.00 ±0.00 e	5.67 ±0.33 g
耕地 Cultivated land	根表 Root surface	62.33 ±1.20 a	30.67 ±0.67 a	173.00 ±2.08 a
	根际 Rhizosphere	54.67 ±0.88 b	26.33 ±0.67 b	35.67 ±0.88 e
	根周 Root zone	31.67 ±1.20 d	14.00 ±0.58 c	8.67 ±0.88 g
	裸地对照 Control Ⅱ	29.00 ±0.58 e	13.67 ±0.33 c	18.67 ±0.67 f

注(Note)：表中数值为平均数±标准误，同一列数据后不同字母表示在5%水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

到根周附近的土壤。考虑到由于非耕地较耕地干燥，土壤粘性差，非耕地的整个根系土壤体积明显小于耕地，所以黄顶菊入侵对土壤微生物的影响在非耕地土壤中超出根周范围。

2.1.3 对土壤酶活性的影响 从表3可以看出，耕地(对照Ⅱ)土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶活性显著高于非耕地(对照Ⅰ)($P<0.05$)。非耕地与耕地中黄顶菊根系周围土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶活性均显著高于对照($P<0.05$)，并且距离根系越近，酶活性越高。非耕地中黄顶菊根表土壤5种酶的活性分别是对照的19.44、5.39、1.64、1.74、4.62倍，其中碱性磷酸酶差异最大。由于采样地土壤整体偏碱性，碱性磷酸酶活性更强，并且说明非耕地土壤有很明显的碱化趋势。耕地中黄顶菊根表土壤5种酶活性分别是对照的2.26、3.45、1.53、0.95、4.89倍。

2.2 黄顶菊入侵对附近玉米根系周围土壤养分、微生物和酶活性的影响

2.2.1 对附近玉米根系周围土壤中速效养分的影响 研究表明，在互作与非互作条件下，玉米根系周围

表3 黄顶菊入侵对土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of *Flaveria bidentis* invasion on activities of soil enzymes

土样来源 Source of soil sample		碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase [$C_6H_5NO_3$ μg/(g·h)]	酸性磷酸酶 Acid Phosphatase [$C_6H_5NO_3$ μg/(g·h)]	脲酶 Urase [NH_3-N mg/(g·d)]	脱氢酶 Dehydrogenase [TPF μg/(g·d)]	蔗糖酶 Invertase [Glucose mg/(g·d)]
非耕地 Non-Cultivated land	根表 Root surface	100.72 ±4.64 a	35.06 ±0.27 a	3.73 ±0.13 c	18.21 ±0.65 a	2.40 ±0.21 b
	根际 Rhizosphere	76.64 ±0.51 b	18.46 ±0.37 e	3.58 ±0.17 c	8.93 ±0.02 e	2.04 ±0.03 c
	根周 Root zone	38.32 ±0.37 c	26.39 ±0.36 b	5.42 ±0.23 a	8.62 ±0.10 e	1.45 ±0.11 d
	裸地对照 Control Ⅰ	5.18 ±1.11 f	6.51 ±0.26 g	2.28 ±0.15 e	10.47 ±0.08 d	0.52 ±0.10 e
耕地 Cultivated land	根表 Root surface	77.73 ±0.58 b	27.09 ±0.22 b	4.17 ±0.11 b	10.86 ±0.01 cd	2.98 ±0.10 a
	根际 Rhizosphere	18.99 ±0.42 e	22.52 ±0.36 d	2.90 ±0.04 d	11.02 ±0.02 cd	2.21 ±0.07 bc
	根周 Root zone	32.33 ±0.44 d	23.78 ±0.16 c	2.8 ±0.04 d	12.96 ±0.03 b	2.50 ±0.06 b
	裸地对照 Control Ⅱ	34.47 ±0.42 cd	7.86 ±0.20 f	2.72 ±0.02 d	11.40 ±0.01 c	0.61 ±0.03 e

注(Note)：表中数值为平均数±标准误，同一列数据后不同字母表示在5%水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

土壤速效磷、速效钾含量均显著高于裸地对照($P<0.05$),速效氮含量显著低于对照($P<0.05$)。互作条件下,玉米根表土壤速效养分(氮、磷、钾)显著低于非互作条件下玉米根表,互作条件下分别是非互作条件下的63.54%、64.70%、80.71%,即黄顶菊的生长显著降低了附近玉米根表土壤中速效养分氮、磷、钾)的含量($P<0.05$)。而在非互作条件下,玉米根表土壤有机质含量是对照的49%,互作条件下是对照的79%,说明非互作比互作条件下玉米根系活力更强,微生物对根表土壤有机质分解利用得更多。在两种条件下,pH在整个根系土壤中差异显著(表4)。

表4　黄顶菊入侵对附近玉米根系周围土壤速效养分的影响

Table 4　Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrients around maize roots

土样来源 Source of soil sample		有机质 Organic matter (g/kg)	速效氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
非互作 Non-interactional	根表 Root surface	13.66 ±0.38 d	84.69 ±1.53 b	7.11 ±0.12 a	111.04 ±0.83 b	7.98 ±0.04 d
	根际 Rhizosphere	27.65 ±0.33 a	76.31 ±1.17 d	10.22 ±0.12 c	103.44 ±0.46 c	8.23 ±0.03 ab
	根周 Root zone	25.91 ±0.40 b	81.16 ±0.44 c	10.22 ±0.21 a	103.44 ±0.83 c	8.35 ±0.06 a
互作 Interactional	根表 Root surface	21.92 ±0.21 c	53.81 ±0.44 e	4.60 ±0.12 d	89.62 ±0.46 d	7.99 ±0.05 d
	根际 Rhizosphere	21.39 ±0.08 c	97.48 ±1.17 a	9.98 ±0.12 a	122.09 ±0.46 a	8.09 ±0.07bcd
	根周 Root zone	26.44 ±0.16 b	85.13 ±0.44 b	8.31 ±0.12 b	110.58 ±0.83 b	8.07 ±0.03cd
	裸地对照 Control Ⅲ	27.72 ±0.29 a	96.60 ±0.00 a	1.37 ±0.12 e	60.38 ±0.79 f	8.2 ±0.05abc

注(Note):表中数值为平均数±标准误,同一列数据后不同字母表示在5%水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

2.2.2 对附近玉米根系周围土壤中可培养微生物的影响　在互作与非互作条件下,玉米根系周围细菌、真菌和放线菌的数量均高于裸地对照(表5)。互作条件下玉米根表土壤细菌、真菌、放线菌数量分别是对照的0.93、2.54、1.62倍;而非互作条件下玉米根表土壤细菌、真菌、放线菌数量分别是裸地对照的2.19、6.20、3.18倍;即黄顶菊入侵显著减少了附近玉米根表土壤中的细菌、真菌、放线菌的数量($P<0.05$)。

2.2.3 对附近玉米根系周围土壤酶活性的影响　研究发现,互作与非互作条件下玉米根系周围土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶的活性均高于裸地对照(表6)。其中,互作条件下比非互作条件下玉米根表土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶的活性下降,玉米根表土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶活性分别是对照的2.75、1.19、1.02、0.98、1.05倍;而非互作条件下玉米根表土壤碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶活性分别是对照的7.56、3.28、1.65、1.35、3.89倍,即黄顶菊的生长显著降低了附近玉米根表土壤中碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶的活性。说明黄顶菊的根系分泌物显著抑制了玉米根系土壤中的酶活性。

2.3　相关性分析

2.3.1 土壤中可培养微生物数量以及土壤养分之间的相关性　土壤生物种群结构和数量主要受到碳源种类和植物根系分泌物的影响,由表7可以看出,真菌与速效磷,放线菌与速效钾极显著相关,相关系数分别是0.545、0.778。有机质与细菌呈极显著负相关,相关系数为-0.662。pH与3类微生物数量均呈极显著的负相关关系,其中pH与真菌数量的相关系数最大,达到0.829。

2.3.2 土壤酶活性与土壤养分之间的相关性　表8显示,速效磷与酸性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶达到极显著正相关,相关系数分别为0.790、0.621、0.806;速效钾与碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶达到极显著正相关,相关系数分别为0.775、0.683、0.712;速效氮与碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶达到极显著正相关,相关系数分别为0.842、0.802、0.740、0.553;有机质与酶活性之间无显著相关性。pH与酶活性之间呈负相关,其中与碱性磷

表5 黄顶菊入侵对附近玉米根系土壤可培养微生物的影响

Table 5 Effects of *Flaveria bidentis* invasion on the quantity of cultivable soil microbe groups around maize roots

土样来源 Source of soil sample		细菌 Bacteria ($\times 10^7$ cfu/g)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ cfu/g)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^4$ cfu/g)
非互作 Non-interactional	根表 Root surface	106.67 ±2.40 a	91.00 ±1.53 a	100.67 ±2.19 a
	根际 Rhizosphere	52.00 ±0.58 cd	47.00 ±1.16 c	82.67 ±1.45 b
	根周 Root zone	59.33 ±0.88 b	41.33 ±1.2 d	72.00 ±1.53 b
互作 Interactional	根表 Root surface	45.33 ±1.33 e	37.33 ±0.67 e	51.33 ±1.20 d
	根际 Rhizosphere	52.00 ±1.16 cd	41.67 ±0.88 d	79.67 ±0.88 b
	根周 Root zone	53.33 ±1.45 c	50.67 ±1.20 b	74.33 ±1.20 c
	裸地对照 Control Ⅲ	48.67 ±1.20 e	14.67 ±0.67 f	31.67 ±0.88 e

注(Note)：表中数值为平均数±标准误，同一列数据后不同字母表示在5%水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

表6 黄顶菊入侵对附近玉米根系周围土壤酶活性的影响

Table 6 Effects of *Flaveria bidentis* invasion on activities of soil enzymes around maize roots

土样来源 Source of soil sample		碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase [$C_6H_5NO_3$ μg/(g·h)]	酸性磷酸酶 Acid Phosphatase [$C_6H_5NO_3$ μg/(g·h)]	脲酶 Urase [NH_3-N mg/(g·d)]	脱氢酶 Dehydrogenase [TPF μg/(g·d)]	蔗糖酶 Invertase [Glucose mg/(g·d)]
非互作 Non-interactional	根表 Root surface	109.18 ±1.69 a	38.14 ±0.27 a	5.61 ±0.02 a	7.26 ±0.01 a	2.92 ±0.06 a
	根际 Rhizosphere	73.45 ±0.27 b	30.47 ±0.28 c	2.30 ±0.04 e	5.45 ±0.02 d	1.80 ±0.03 b
	根周 Root zone	19.39 ±0.58 f	34.5 ±0.18 b	2.63 ±0.02 d	6.63 ±0.03 b	1.83 ±0.03 b
互作 Interactional	根表 Root surface	39.73 ±0.56 c	13.87 ±0.23 e	3.48 ±0.12 c	5.27 ±0.01 f	0.79 ±0.02 e
	根际 Rhizosphere	24.51 ±0.30 e	22.80 ±0.45 d	2.43 ±0.08 de	4.83 ±0.01 g	1.12 ±0.03 d
	根周 Root zone	31.94 ±0.56 d	23.51 ±0.41d	4.23 ±0.12 b	6.05 ±0.03 c	1.24 ±0.00 c
	裸地对照 Control Ⅲ	14.44 ±0.78 g	11.63 ±0.22 f	3.40 ±0.01 c	5.38 ±0.04 e	0.75 ±0.01 e

注(Note)：表中数值为平均数±标准误，同一列数据后不同字母表示在5%水平上差异显著(Fisher's LSD test) Values are means ± SE; Values followed by different letters in the same column are significantly different at $P<0.05$ (Fisher's LSD test).

表7 土壤中可培养微生物数量以及土壤养分含量之间的相关性

Table 7 Correlations between the soil microbe populations and soil nutrient contents

项目 Item	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	pH
细菌 Bacteria	−0.662**	0.088	0.488*	−0.095	−0.793**
真菌 Fungi	−0.480*	0.379	0.545**	0.197	−0.829**
放线菌 Actinomycetes	0.195	0.835**	0.265	0.778**	−0.506*

注(Note)：* 和 ** 分别表示在0.05和0.01水平上显著相关 Mean significant correlations at the 0.05 and the 0.01 levels, respectively.

表 8　土壤酶活性与土壤养分含量之间的相关性

Table 8　Correlations between the soil enzyme activities and soil nutrient contents

项目 Item	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	pH
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.393	0.842**	0.393	0.775**	-0.545**
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.004	0.802**	0.790**	0.683**	-0.644**
脲酶 Urase	0.278	0.740**	0.117	0.712**	-0.319
脱氢酶 Dehydrogenase	0.105	0.275	0.621**	0.162	-0.316
蔗糖酶 Invertase	-0.226	0.553**	0.806**	0.450*	-0.669**

注(Note):* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关 Mean significant correlations at the 0.05 and the 0.01 levels, respectively.

酸酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶之间达到极显著负相关,相关系数分别为 0.545、0.644、0.669。

3　讨论

植物根系分泌物可能直接影响附近植物的生长,也可能通过改变土壤微生物的种群结构间接影响到附近植物的生长[11-12]。本研究结果显示,黄顶菊无论入侵耕地还是非耕地,其根系周围土壤的可培养细菌、真菌、放线菌数量明显多于裸地对照,且距离根系越近,微生物数量越多,黄顶菊对非耕地中可培养细菌、真菌、放线菌数量的提升更为明显。植物根系分泌物主要含有各种无机离子、有机酸、可溶性糖和一些生理活性物质,这些物质为土壤微生物的生长繁殖提供了碳、氮营养,因此,根系周围土壤往往聚集着更多的微生物。Reinhart 等用入侵物种美国野樱桃(black cherry)预培养过的土壤培养当地植物,当地植物的生长受到明显抑制[13]。Fumanal 等认为外来豚草能够借助土壤 AMF 增加其竞争优势[14];葱芥(*Alliaria petiolata*)是成功入侵北美森林的芸苔类植物,其能在土壤中分泌植物性硫配醣体类物质,并在土壤中不断积累,使土壤微生物群落改变,AMF 数量减少,本土植物群落退化[15-16]。赵小亮等用稀释后的棉花根系分泌物处理土壤,培养 10 d 后,土壤中可培养细菌、真菌数量显著增加,土壤中速效氮、速效磷、速效钾的含量也显著增加。但是试验并没有排除棉花根系分泌物中可能含有的氮、磷、钾本身对土壤中速效氮、速效磷、速效钾含量的影响[17]。

黄顶菊根系周围土壤酶活性总体上显著高于对照,速效氮、速效磷、速效钾的含量亦均显著高于对照,物种之间常常通过调节自身根际土壤养分的有效性来达到竞争取胜的目的[18-19]。土壤酶活性主要来源于土壤微生物及其分泌物,其次来源于植物根系分泌物和动物。本试验测定的碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶的活性与土壤微生物数量有显著的相关性(相关数据未列出)。预示这些酶主要来源于根系周围的微生物及其分泌物。根系周围土壤酶活性的提高可能是根系周围速效氮、磷、钾含量增加的重要原因之一。有研究表明,紫茎泽兰的入侵显著提高了土壤中有效养分的含量,有植物生长的土壤其养分含量极显著高于裸地土壤($P<0.01$),而入侵地土壤要高于当地植物土壤,土壤酶活性的结果显示与土壤养分结果有相同的趋势。

蛋白酶、脲酶可催化土壤有机质中的有机态氮转化为无机态氮,黄顶菊的入侵使土壤中氮素转化加快,蔗糖酶可增加土壤中可溶性糖含量,为微生物的生长繁殖提供了碳源;与氮、钾相比,磷是土壤环境中最难移动和最难被利用的营养元素,因此它也是植物生长的首要限制性因素。根系周围微生物既可通过释放的有机酸来活化无机磷,也可通过释放碱性磷酸酶促进根际土壤中有机磷的释放。本试验速效磷与细菌数量呈显著正相关,相关系数达到 0.488;与真菌呈极显著正相关,相关系数达到 0.545。在非耕地与耕地根表土壤中碱性磷酸酶活性分别是对照的 19.44、2.26 倍。许多常见土壤微生物,如假单胞菌属、无色杆菌属、黄杆菌属、链霉菌属,尤其是曲霉属、节杆菌属中的一些种能溶解土壤矿物质中难溶性的无机磷[20-21]。

4　结论

本研究表明,黄顶菊入侵降低了附近玉米根表土壤中可培养细菌、真菌、放线菌的数量以及土壤酶活性和速效养分含量。基于此,认为有必要鉴定

出黄顶菊根际土壤的主要功能微生物,即需明确哪些菌促进了土壤有机质中氮、磷、钾的转化与释放,哪些菌促进了土壤矿物质中磷、钾的转化与释放,这可能是黄顶菊能在贫瘠土壤条件下生长良好的重要原因之一。本研究结果也将为多功能生物菌肥的开发利用奠定基础。

参考文献:

[1] 任艳萍,古松,江莎,郑书馨,赵娜. 外来植物黄顶菊营养器官解剖特征及其生态适应性[J]. 生态学杂志,2009,28(7):1239-1244.
Ren Y P, Gu S, Jiang S, Zheng S X, Zhao N. Anatomical characters of vegetative organs and ecological adaptability of new alien species *Flaveria bidentis*[J]. Chin. J. Ecol., 2009, 28(7): 1239-1244.

[2] 商闫,韩建民,时翠平,等. 黄顶菊对几种作物生长影响的作用机理初步研究[J]. 河北农业大学学报,2010,33(6):91-94.
Shang Y, Han J M, Shi C P *et al*. Preliminary study on mechanism of *Flaveria bidentis* influences the growth of nearby crops[J]. J. Agric. Univ. Hebei., 2010, 33(6): 91-94.

[3] Levine J M, Vila M, D'Antonio C M *et al*. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions[J]. Proceedings of the royal society B: Biol. Sci., 2003, 270(1517): 775-781.

[4] Maron J L, Vila M, Bommarco R *et al*. Rapid evolution of an invasive plant[J]. Ecol. Monographs, 2004, 74(2): 261-280.

[5] Duda J J, Freeman D C, Emlen J M *et al*. Differences in native soil ecology associated with invasion of the exotic annual chenopod. *Halogeton glomeratus*[J]. Biol. Fert. Soils, 2003, 38(2): 72-77.

[6] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Haggblom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil[J]. Ecology, 2002, 83(11): 3152-3166.

[7] 何博,贺学礼. 黄顶菊根 AM 真菌与土壤因子相关性研究[J]. 河北农业大学学报,2010,33(1):34-38.
He B, He X L. Study on correlations between AM fungi and soil factors in the rhizosphere of *Flaveria bidentis*[J]. J. Agric. Univ. Hebei, 2010, 33(1): 34-38.

[8] Fujii Y, Furubayashi A, Hiradate S. Rhizosphere soil method: a new bioassay to evaluate allelopathy in the field[A]. Harper J D I, An M, Wu H, Kent J H. Proceedings and selected papers of the Fourth World congress on Allelopathy[C]. Wagga Wagga New South Wales, Australia: Internation Allelopathy Society, 2005, 8: 490-492.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000. 25-108.
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry (3rd Edn)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000, 25-108.

[10] 姚怀应,黄昌永. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京:科学出版社,2006. 128-189.
Yao H Y, Huang C Y. Microbial ecology and experimental technology[M]. Beijing: Science Press, 2006. 128-189.

[11] Kaur H, Kaur R, Kaur S, Baldwin I T, Inderjit. Taking ecological function seriously: soil microbial communities can obviate allelopathic effects of released metabolites[J]. PLoS One, 2009, 4(3): e4700.

[12] Klironomos J N. Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities[J]. Nature, 2002, 417(6884): 67-70.

[13] Reinhart K O, Packer A, Putten W H V, Clay K. Plant-soil biota interactions and spatial distribution of black cherry in its native and invasive ranges[J]. Ecol. Lett., 2003, 6(12): 1046-1050.

[14] Fumanal B, Plenchette C, Chauvel, Bretagnolle F. Which role can arbuscular mycorrhizal fungi play in the facilitation of *Ambrosia artemisiifolia* L. invasion in France?[J]. Mycorrhiza, 2006, 17(1): 25-35.

[15] Roberts K J, Anderson R C. Effect of garlic mustard [*Alliaria petiolata* (*Beib. Cavara & Grande*)] extracts on plants and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi[J]. Am. Midl. Nat., 2001, 146(1): 146-152.

[16] Suding K N, Larson J R, Thorsos E *et al*. Species effects on resource supply rates: do they influence competitive interactions?[J]. Plant Ecol., 2004, 175(1): 47-58.

[17] 赵小亮,刘新虎,贺江舟,等. 棉花根系分泌物对土壤速效养分和酶活性及微生物数量的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(7):1426-1431.
Zhao X L, Liu X H, He J Z *et al*. Effects of cotton root exudates on available soil nutrition, enzyme activity and micro organism quantity[J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2009, 29(7): 1426-1431.

[18] Perry L G, Galatowitsch S M, Rosen C J. Competitive control of invasive vegetation: a native wetland sedge suppresses *Phalaris arundinacea* in carbon-enriched soil[J]. J. Appl. Ecol., 2004, 41(1): 151-162.

[19] Vitousek P M, Aber C J, Howarth R W *et al*. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecol. Appl., 1997, 7(3): 737-750.

[20] Agnihotri V P. Solubilisation of insoluble phosphates by some soil fungi isolated from nursery seedbeds[J]. Canad. J. Microbiol., 1970, 16(9): 877-880.

[21] Sperber J I. The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil[J]. Austr. J. Agric. Res., 1958, 9(6): 778-781.