

减施氮磷条件下微生物肥料对东北黑土区玉米生长和产量的影响

李可可¹, 陈 腊¹, 米国华², 胡 栋³, 隋新华¹, 陈文新¹

(1. 中国农业大学生物学院/农业部土壤微生物重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;
3. 河北农林科学院遗传生理研究所, 石家庄 050051)

摘 要: 在吉林黑土地地区, 在减氮肥 50%、减磷肥 100% 条件下, 评价 15 种商业微生物肥料对玉米生长和产量的影响。与常规施肥相比, 减氮肥 50% 处理减产 3.6% ~ 5.5%; 不施磷肥减产 0.6% ~ 4.1%。在减氮条件下, 33.3% 的微生物肥料稳定增产, 增产率为 15.7% ~ 35.5% (平均增产 25.6%); 在不施磷条件下, 26.7% 的微生物肥料稳定增产, 增产率为 9.7% ~ 21.5% (平均增产 15.6%)。生物有机肥的增产效果优于菌剂接种。含有链霉菌、胶冻样芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、多粘类芽孢杆菌及木霉菌等微生物的生物有机肥, 增产效果较好。

关键词: 玉米; 黑土; 微生物肥料; 氮肥减施; 磷肥减施

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Microbial Fertilizers on Growth and Yield of Maize under the Conditions of Nitrogen and Phosphorus Reduction in Black Soil of Northeast China

LI Ke-ke¹, CHEN La¹, MI Guo-hua², HU Dong³, SUI Xin-hua¹, CHEN Wen-xin¹

(1. College of Biological Science, China Agricultural University

/Ministry of Agriculture Key Lab of Soil Microbiology, Beijing 100094;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094;

3. Institute of Genetics and Physiology, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In the black soil of Jilin, Northeast China, a two-year field trials were conducted to evaluate the effect of 15 commercial microbial fertilizers on maize growth and yield under the conditions of 50% nitrogen application (as low N) and no phosphorus application (as low P), respectively. The results showed that low N reduced maize grain yield by 3.6% to 5.5% in 2018 and 2019, respectively, and low P reduced maize grain yield by 0.6% to 4.1%, respectively. Under low N, 33% of the microbial fertilizers increased grain yield by the degree of 15.7% to 35.5% (25.6% in average). Under low P, 26.7% of the tested microbial fertilizers increased grain yield by the degree of 9.7% to 21.5% (15.6% in average). The effect of bio-organic fertilizer was significantly better than that of bacterial inoculants. Bio-organic fertilizer contains *Streptomyces*, *Bacillus mucilaginous*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus polymyxa*, and *Trichoderma* had good effect in increasing grain yield.

Key words: Maize; Black soil; Microbial fertilizer; Nitrogen fertilizer reduction; Phosphorus fertilizer reduction

录用日期: 2020-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201801)

作者简介: 李可可(1994-), 河南周口人, 博士, 研究方向为玉米-微生物互作。Tel: 16619738240

E-mail: cau914086175@163.com

隋新华为本文通讯作者。E-mail: suixh@cau.edu.cn

近 30 年我国化肥用量增长 6 倍, 而粮食产量仅增长 3 倍(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>), 导致化肥的利用效率越来越低。2019 年我国水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率为 39.2% (<http://www.moa.gov.cn/>), 明显低于世界同期水平^[1]。过量施用化肥, 不仅造成其原料的浪费, 还造成土壤酸化板结、硝酸盐淋洗造成地下水污染以及产生的氧化亚氮造成的温

室效应等危害^[2,3]。因此,化肥的减施增效倍受关注。

土壤是巨大的微生物库^[4],微生物在土壤养分转化中起到巨大作用。植物根周围有益微生物具有产生生长素和铁载体、固氮、溶磷解钾、生防、耐盐和耐干旱的功能,可促进植物生长和增强植物耐受环境胁迫能力^[5~9]。微生物组学研究证明,生态环境中微生物区系复杂多样,很难实现人为的定向控制,最有效的解决办法是在农作物上接种含有益的微生物肥料,促使作物根部微生物新区系的形成并改善环境,从而更好地促进植物的生长发育^[10]。

微生物肥料主要包括微生物接种剂、复合微生物肥料和生物有机肥^[11]。按照肥料中添加菌种种类分为单一菌剂和复合微生物肥料,其中复合微生物肥料中包含多种菌复合(复合菌剂)、菌和各种添加剂的复合^[12]。微生物肥料在 70 多个国家得到应用。在欧美等发达国家,微生物肥料应用占据了肥料总量的 20%以上,在阿根廷和巴西等南美国家,玉米微生物肥料应用已经有 50 多年的历史^[13]。我国

微生物肥料产品主要应用于蔬菜、果树、茶叶、中草药等经济作物^[14],在粮食作物上应用不普遍。有研究报道,微生物肥料可促进玉米生长和增加产量,可替代 10%~30% 的复合化学肥料^[15~19],缺乏在减少氮肥或者磷肥情况下的针对性研究。微生物生长与土壤生态条件关系密切,东北黑土区是我国重要的玉米商品粮基地,针对该区域的微生物肥料效果评价尚缺乏系统研究。本研究通过两年的氮肥和磷肥减施定位试验,评价 15 种商业微生物肥料在玉米减肥增效中的应用效果,明确氮磷减施条件下微生物肥料对该地区玉米生长和产量的影响,评价微生物肥料的应用效果,为应用微生物肥料实现玉米减肥增效提供技术手段。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择市场上的微生物肥料,编号 BF1–BF15,具体信息见表 1。

表 1 供试微生物肥料信息
Table 1 Tested microbial fertilizers information

编 号 Number	微生物肥料类型 Type of microbial fertilizer	菌种类型和主要功能 Strain species and main functions	用量(kg/hm ²) Dosage	有效活菌数(cfu) Viable count	N、P、K 等成分含量 Content of N, P, K and other components
BF1	生物有机肥	胶冻样芽孢杆菌:分解硅酸盐矿物、溶无机磷、解钾、固氮和增强作物抗病能力;巨大芽孢杆菌:溶有机和无机磷、解钾、生防	525	≥2.0 亿/g	有机质 ≥40%;腐植酸 ≥10%;核苷酸 ≥10%;中微量元素
BF2	生物有机肥	枯草芽孢杆菌:产生挥发性有机物调节植物源 IAA、溶磷、解钾、固氮、生防	1 920	≥0.2 亿/g	N+P ₂ O ₅ +K ₂ O ≥8%;有机质 ≥40%;氨基酸 ≥2%
BF3	生物有机肥	酒红土褐链霉菌:链霉菌 S506 溶有机磷、产生 IAA、生防	2 460	≥0.2 亿/g	有机质 ≥40%
BF4	生物有机肥	胶冻样芽孢杆菌	3 000	>1.2 亿/g	未标注
BF5	生物有机肥	枯草芽孢杆菌;胶冻样类芽孢杆菌(溶无机磷、解钾)	525	≥1.0 亿/g	未标注
BF6	生物有机肥	枯草芽孢杆菌;地衣芽孢杆菌:生防	2 460	≥5.0 亿/g	氮磷钾 ≥8%;有机质 ≥30%;氨基酸 ≥4%;粗蛋白 ≥12%;微量元素
BF7	生物有机肥	枯草芽孢杆菌	1 920	≥5.0 亿/g	氮磷钾 ≥6%;有机质 ≥30%;粗蛋白 ≥8%;中量元素钙 ≥6%;氨基酸 ≥4%
BF8	生物有机肥	有益活性菌(促生)	2 460	未标注	氮磷钾 ≥5–5–5;有机质 ≥20%;硅 ≥28%;微量元素
BF9	生物有机肥	富含枯草芽孢杆菌、多粘类芽孢杆菌(固氮、溶磷、生防)、木霉菌、食线虫菌、根际细菌、放线菌、固氮解磷解钾菌、调节植物生长有益菌、酵母菌、硅酸盐菌等 5 科 10 属 80 余种微生物菌群	2 460	≥0.2 亿/g	有机质 ≥40%

续表 1 Continued 1

编号 Number	微生物肥料类型 Type of microbial fertilizer	菌种类型和主要功能 Strain species and main functions	用量(kg/hm ²) Dosage	有效活菌数(cfu) Viable count	N、P、K等成分含量 Content of N, P, K and other components
BF10	复合菌剂	解淀粉芽孢杆菌:生防、抗逆;胶冻样类芽孢杆菌	525	≥10.0 亿/g	微量元素、氨基酸、维生素、多糖及促生长因子等
BF11	复合菌剂 (磷钾专用菌肥)	胶冻样类芽孢杆菌/巨大芽孢杆菌	2.49 L/hm ²	5.0 亿/g	未标注
BF12	单一菌剂	胶冻样芽孢杆菌	15 L/hm ²	2.0 亿/mL	未标注
BF13	复合菌剂	胶冻样类芽孢杆菌/枯草芽孢杆菌	6	≥100 亿/g	未标注
BF14	复合菌剂	内生芽孢杆菌:固氮、产生植物激素、生防	0.6	≥200 亿/g	未标注
BF15	单一菌剂	胶冻样芽孢杆菌	7.5 L/hm ²	≥5 亿/mL	未标注

1.2 试验设计

试验于2018~2019在吉林省四平市梨树县四棵镇乡进行(124°7'33'' E 43°20'15'' N,海拔131 m),该地区北温带半湿润大陆性季风气候,土壤类型为黑土,土壤基础理化性质见表2。2018和2019年玉

米生育期日降水量具体情况见图1,生育期总降雨量分别为594.4 mm和613.5 mm,主要集中在7~8月份,5月上半旬即播种后两周降雨总量均小于22.4 mm,非常干旱。2019年降雨模式与2018年基本相似,降雨量多于2018年。

表 2 试验地基础条件(0~20 cm)

Table 2 Basic chemical properties of the 0–20 cm soil in the experimental field

土层 (cm)	全氮 (g/kg)	有机质 (g/kg)	速效P (mg/kg)	速效K (mg/kg)	pH值 pH value	土壤电导率(ms/m) Soil electric conduction	铵态氮 (mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 (mg/kg) NO ₃ ⁻ -N
Soil depth	Total N	Organic Matter	Available P	Available K				
0~20	1.85	24.7	86.8	178	5.4	12.5	1.445	7.185

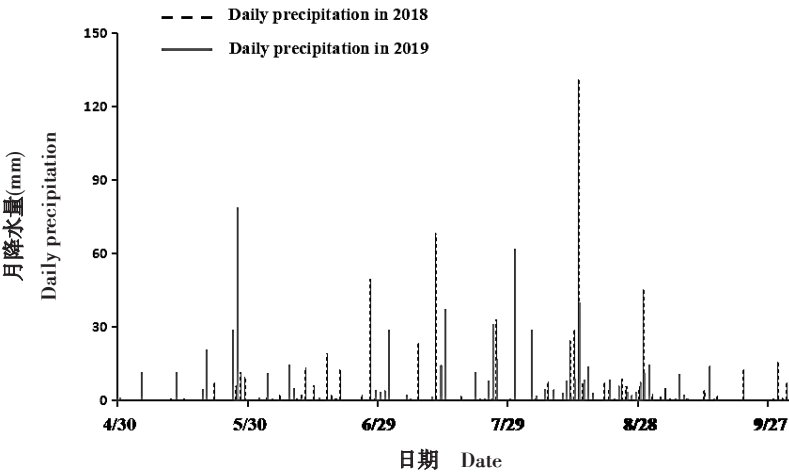


图 1 试验点玉米生育期内日降水量数据

Fig.1 Daily rainfall in maize growth period

试验采用裂区设计,主区为施肥处理,副区为微生物肥料处理。施肥处理分为氮肥减施区和磷肥减施区。常规施肥处理中,氮肥用量为240 kg/hm²,磷肥用量为85 kg/hm²,钾肥用量为67.5 kg/hm²,所用肥

料分别为尿素(N,≥46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅,≥12%)、氯化钾(K₂O,≥60%)。氮肥减施区将氮肥用量减少50%(120 kg/hm²),磷肥减施区不施磷肥,其他肥料与常规施肥一致。所有化肥均采用播前一次性施入,

玉米生育期间不再追肥。试验处理共33个,氮肥减施区和磷肥减施区各设15个微生物肥料处理和1个不施微生物肥料空白对照(CK),另包括1个常规施肥处理(NFT)。小区面积16 m²,7垄区,垄长4米,每个处理3次重复。玉米品种郑单958(未包衣),种植密度70 000株/hm²。

2018年4月30日播种,由于播种时天气持续干旱,分别在播种后第2天和第12天进行喷灌;2019年5月1日播种,并于第2天喷灌。肥料施用方法因肥料类型而异,BF1–BF10是固体肥料采用穴施方法,将肥料和土壤按1:2或1:3比例混合后播种;BF11–BF15是液体或粉剂肥料,采用种子包衣的方法,肥料用量依商品使用指南的推荐量(表1)。

1.3 测定指标与方法

基础土样采集:4月底整地前,用土钻取0~20 cm耕层土,5点取样法,等量混合后自然风干,去除秸秆杂物,并用粉样机粉碎过0.1 mm筛,用于土壤基础理化性质测定;

株高和地上干重:根据整体长势,每个小区随机选取植株4株,测量株高;然后从茎基部砍断,样品分开后剁碎,装入网袋,在通风处晾晒,最后在85℃烘箱中烘至恒重,测定植株干重;

叶面积=展开叶长×宽×0.75+未完全展开叶长×宽×0.5;

植株性状测定分别在V5(植株有5片展开叶,出

苗后25 d左右,即苗期)、V8(有8片展开叶,出苗后45 d左右,即拔节期)、R1(出苗后73 d左右,即吐丝期)进行^[20];

产量性状测定:在R6(出苗145 d左右,即生理成熟期)收获每个小区的中间2行,调查雌穗数、空秆数、双穗数,测定子粒干重、百粒重、穗粒数等指标^[21]。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft office Excel 2016 进行数据初步整理,采用Excel 和 PowerPoint 作图,采用IBM SPSS Statistics 21.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥减施下微生物肥料的效果

2.1.1 玉米株高、生物量和叶面积

两年数据分析结果可知(表3),与CK相比,2018年微生物肥料BF3、BF4、BF5和BF7处理的玉米在两个或3个生育时期(BF4)显著促进了株高和地上部干物质的提高;BF9和BF11处理分别促进玉米后两个时期的地上部干物质和株高的增加;BF6处理促进吐丝期株高和拔节期地上部干物质的增加,BF2处理促进了玉米拔节期地上部干物质的增加;所有促生显著的处理均与NFT对照水平一致。BF1、BF8、BF10、BF12、BF13、BF14、BF15处理对不同时期的玉米植株均无显著促生效果,其中,BF8的效果最差,严重影响出苗,BF1次之。

表3 氮肥减施区微生物肥料对玉米株高、生物量和叶面积的影响
Table 3 Effects of microbial fertilizers on plant height, biomass and leaf area in nitrogen fertilization reduction area

年 份 Year	处 理 Treatment	不同生育时期株高(cm) Plant height at different growth stages			不同生育时期地上部干重(g) Dry matter accumulation at different growth stages			不同生育时期叶面积(cm ²) Leaf area at different growth stages	
		V5	V8	R1	V5	V8	R1	V5	V8
2018	BF1	38.8 b	154 cdef	231 cd	2.0 bcd	27.5 abcd	110 bc	—	3 775 abc
	BF2	42.3 ab	166 abcd	231 cd	2.2 abcd	31.1 ab*	108 bc	—	3 470 abc
	BF3	48.1 a*	177 a*	248 a*	3.1 a*	34.3 a*	119 abc	—	4 229 a
	BF4	47.9 a*	171 ab*	246 ab*	2.9 ab*	33.0 ab*	126 ab*	—	3 983 ab
	BF5	46.3 ab	171 ab*	241 abc*	2.9 abc*	34.1 a*	115 abc	—	3 992 ab
	BF6	44.1 ab	161 bcdef	244 abc*	2.5 abcd	33.6 a*	119 abc	—	3 898 abc
	BF7	45.7 ab	162 bcdef	244 abc*	2.9 ab*	30.8 abc	127 ab*	—	3 937 abc
	BF8	39.6 b	151 ef	225 d	2.1 bcd	27.5 abcd	112 abc	—	3 189 bc
	BF9	42.3 ab	163 bcde	239 abcd	2.4 abcd	32.4 ab*	135 a*	—	3 741 abc
	BF10	39.8 b	157 cdef	237 abcd	1.8 cd	29.1 abcd	109 bc	—	3 470 abc
	BF11	44.7 ab	167 abc*	240 abc*	2.4 abcd	29.5 abcd	111 abc	—	3 778 abc
	BF12	42.7 ab	158 cdef	239 abcd	2.0 bcd	26.0 bcd	108 bc	—	3 480 abc
	BF13	40.6 ab	156 cdef	233 abcd	1.7 d	28.1 abcd	105 bc	—	3 506 abc
	BF14	42.5 ab	150 f	232 bcd	1.2 bcd	23.4 d	106 bc	—	3 022 c
	BF15	43.2 ab	163 bcdef	230 cd	2.0 bcd	26.0 bcd	108 bc	—	3 376 abc

续表3 Continued 3

年 份 Year	处 理 Treatment	不同生育时期株高(cm) Plant height at different growth stages			不同生育时期地上部干重(g) Dy matter accumulation at different growth stages			不同生育时期叶面积(cm ²) Leaf area at different growth stages	
		V5	V8	R1	V5	V8	R1	V5	V8
2018	CK	39.7 b	152 def	224 d	1.8 d	23.7 cd	100 c	—	3 373 abc
	NFT	48.9 a*	166 abcd	237 abcd	2.6 a*	33.3 a*	129 ab*	—	4 000 ab
2019	BF1	37.0 bcd	121 abcd	257 abcd	1.8 abcdef	28.4 cde	93 ef	179 abcde	2 332 abcd
	BF2	38.0 abcd	122 abcd	258 abcd	1.6 bcdef	27.6 de	108 bcd	195 abcde	2 216 abcde
	BF3	43.8 a*	132 a*	269 ab*	2.4 a*	37.3 abc*	119 ab*	248 ab*	2 523ab*
	BF4	44.3 a*	130 ab*	258 abcd	2.4 ab*	38.5 ab*	121 ab*	246 abc*	2 569 ab*
	BF5	43.1 ab*	127 abc	259 abcd	2.0 abcde*	34.63 abcd	104 cde	233 abcd	2 573 ab*
	BF6	42.3 abc*	135 a*	258 abcd	2.2 abc*	37.3 abc*	117 abc*	243 abc*	2 736 a*
	BF7	44.4 a*	135 a*	259 abcd	2.3 abc*	36.5 abcd	120 ab*	239 abc*	2 471 abc
	BF8	35.8 cd	106 d	243 d	1.3 ef	22.3 e	92 ef	150 e	1 562 f
	BF9	42.0 abc	130 ab*	265 abc*	2.2 abc*	38.1 ab*	119 ab	244 abc*	2 625 ab*
	BF10	39.2 abcd	112 cd	253 abcd	1.7 abcdef	22.6 e	104 cde	198 abcde	1 858 def
	BF11	39.3 abcd	110 d	254 abcd	1.4 def	23.4 e	97 def	169 cde	1 705 ef
	BF12	38.8 abcd	112 cd	259 abcd	1.6 cdef	29.0 bcde	99 def	175 abcde	2 217 abcde
	BF13	38.2 abcd	116 bcd	253 bcd	1.4 def	22.8 e	100 def	171 bcde	2 071 bedef
	BF14	37.0 bcd	110 d	258 abcd	1.3 ef	22.2 e	101 def	153 c	1 548 f
	BF15	36.3 cd	112 cd	250 cd	1.1 f	23.7 e	88 f	134 e	1 696 ef
	CK	34.7 d	114 cd	249 cd	1.2 f	27.5 de	95 def	160 de	1 958 cdef
	NFT	43.1 ab*	133 a*	271 a*	2.1 abcd*	40.7 a*	127 a*	251 a*	2 654 ab*

注:与CK比标识“*”为显著促生处理,不同小写字母表示在0.05水平差异显著,“—”代表数据未展示。下表同。

Note: Comparing with CK, the numbers represent significant growth promotion in boldface with *. Different letters represent significant difference at the 0.05 level. “—” represents data not shown. The same below.

2019年分析结果表明(表3),与CK处理相比,微生物肥料BF3、BF4、BF6和BF9至少在玉米的两个或3个生育时期显著促进株高、地上部干物质和叶面积的增加;BF7处理有两个时期对株高、地上部干物质有显著促进作用,并显著增加苗期叶面积;BF5处理仅显著促进苗期株高、地上干重和拔节期的叶面积;所有促生显著的处理都和NFT水平一致。BF1、BF2、BF8、BF10、BF11、BF12、BF13、BF4、BF15处理对不同时期的玉米植株均无显著促生效果,其中,菌肥BF8的效果最差。

综合两年结果分析,相比CK处理,供试微生物肥料中有40%表现出促进苗期生长的效果,其中,BF3、BF4、BF5、BF7处理两年效果稳定。两年平均,BF3、BF4、BF9处理在整个玉米生育周期内促生效果最佳,尤其对玉米株高和地上部干重的促生效果上。微生物肥料BF6、BF7处理促生效果仅次于前三者,2019年5种菌肥效果明显好于2018年。

2.1.2 玉米产量和产量构成因素

相比NFT处理,减施氮肥50%条件下,第一年减

产3.6%,第二年减产5.5%(表4)。2018年,与CK处理相比,BF3、BF4、BF6、BF7、BF9、BF12处理的玉米产量显著增加,与NFT处理无差异,增产范围为25.0%~35.5%。微生物肥料BF3、BF7处理通过促进穗粒数、百粒重使产量得以提高;BF4、BF6、BF9和BF12处理通过促进百粒重提高产量;BF1和BF8处理显著促进穗粒数和百粒重,由于前期出苗率过低,导致收获穗数和产量比其他处理明显降低。在氮肥减施区,所有微生物肥料处理都显著增加玉米百粒重,说明这一性状在玉米增产中起到重要作用。

2019年结果与CK相比,BF3、BF4、BF6、BF7、BF9处理的玉米产量显著增加,与NFT处理无差异,增产率为15.7%~23.5%。BF3、BF9处理通过促进穗粒数、百粒重使产量得以提高;BF4、BF6、BF7处理主要通过促进百粒重提高产量。在氮肥减施区,所有显著增产的肥料处理的玉米百粒重均显著增加,说明这一性状在玉米增产中起到重要作用。

两年产量结果综合分析,供试微生物肥料中有40%表现出增加玉米产量的效果,其中BF3、BF4、

BF6、BF7、BF9处理两年效果稳定。两年平均,BF3、BF4、BF6、BF7和BF9处理比CK分别增产23.5%~35.5%、19.9%~29.7%、16%~25%、15.7%~34.5%、19.6%~31.4%,与正常施肥水平无显著差异。增产的原因主要取决于百粒重,其次是穗粒数的增加。

表4 氮肥减施区微生物肥料对玉米产量及产量构成的影响
Table 4 Effects of microbial fertilizers on yield and yield components in nitrogen fertilization reduction area

年 份	处 理	产 量	减肥条件下的增产率(%)	比常规施肥减产率(%)	收获穗数	穗粒数(粒)	百粒重
Year	Treat ment	(kg/ hm ²) Yield	Yield increase under reduced fertilizer input	Yield reduction rate compared to NFT	(穗/ hm ²) Ear number	Grain number per ear	(g) 100-grain weight
2018	BF1	10 375 bc	8.4	—	47 619 b*	559 a*	34.3 a*
	BF2	11 693 abc	22.1	—	65 873 a	479 cd	32.4 ab*
	BF3	12 974 a*	35.5	0.2	69 048 a	516 abc*	32.0 ab*
	BF4	12 414 ab*	29.7	4.5	69 048 a	491 abcd	32.1 ab*
	BF5	11 161 abc	16.6	—	69 048 a	438 d	32.4 ab*
	BF6	11 965 ab*	25.0	7.9	63 492 a	489 bcd	33.8 ab*
	BF7	12 876 a*	34.5	0.9	65 873 a	514 abc*	33.4 ab*
	BF8	4 556 d	-52.4	—	21 429 c*	551 ab*	34.0 ab*
	BF9	12 584 ab*	31.4	3.2	65 873 a	507 abcd	33.1 ab*
	BF10	11 623 abc	21.4	—	65 079 a	490 bcd	32.1 ab*
	BF11	11 375 abc	18.8	—	68 254 a	464 cd	31.6 b*
	BF12	12 343 ab*	28.9	5.0	66 667 a	506 abcd	32.1 ab*
	BF13	11 016 abc	15.1	—	61 111 a	481 cd	33.0 ab*
	BF14	11 369 abc	18.8	—	61 111 a	503 abcd	32.5 ab*
	BF15	11 554 abc	20.7	—	64 286 a	472 cd	33.4 ab*
2019	CK	9 573 c	—	—	65 187 a	439 d	29.3 c
	NFT	12 997 a*	35.8	—	65 873 a	526 abc*	33.0 ab*
	BF1	10 633 cd	4.2	—	55 556 bcd	454 d	39.0 cdefg*
	BF2	11 000 bcd	7.8	—	52 469 cd	477 cd	37.8 defgh
	BF3	12 600 a*	23.5	1.8	61 728 abc	535 abc	41.2 abc*
	BF4	12 233 ab*	19.9	4.7	61 111 abc	516 abcd	40.6 abcd*
	BF5	10 333 cd	1.3	—	62 963 abc	476 cd	37.7 defgh
	BF6	11 833 abc*	16.0	7.8	60 494 abc	504 abcd	39.2cdef*
	BF7	11 800 abc*	15.7	8.0	61 111 abc	501 abcd	39.3 cdef*
	BF8	6 633 e	-35.0	—	44 445 d	486 cd	42.5 ab*
	BF9	12 200 ab*	19.6	4.9	61 111 abc	563 ab*	39.9 bcde*
	BF10	9 467 d	-7.2	—	54 321 cd	478 cd	37.5 efgh
	BF11	10 867 bcd	6.5	—	68 519 a	491 bcd	36.2 gh
	BF12	10 467 cd	2.6	—	67 284 ab	522 abcd	37.9 defgh
	BF13	10 500 cd	2.9	—	67 284 ab	448 d	36.5 fgh
	BF14	9 733 d	-4.6	—	64 197 abc	455 d	38.3 cdefgh
	BF15	10 000 d	-2.0	—	67 901 a	456 d	37.4 efgh
	CK	10 200 d	0.0	—	61 728 abc	474 cd	35.9 h
	NFT	12 833 a*	25.8	0.0	66 667 ab	568 a*	42.7 a*

2.1.3 减氮条件下生物有机肥与单施菌剂增产效果
供试微生物肥料中的生物有机肥处理下玉米增产率为20.95%,高于单施菌剂处理9.99%(图2),处理间差异极显著($P<0.01$)。说明在氮肥减施区生物有机肥玉米产量促生效果明显好于单一菌剂或复合菌剂处理。

2.2 磷肥减施区微生物肥料的效果
2.2.1 玉米株高、地上部干物质和叶面积
两年分析结果可知(表5),2018年全部处理在后两个时期株高无显著差异;与CK处理相比,BF3、BF4和BF9处理显著促进苗期株高和3个时期的地上部干物质积累;BF7和BF11处理显著促进苗期株

高及苗期和吐丝期地上部干物质增加;其余7种肥料也显著促进了吐丝期的地上部干物质积累;BF10、BF13和BF14处理无显著的促生效果。

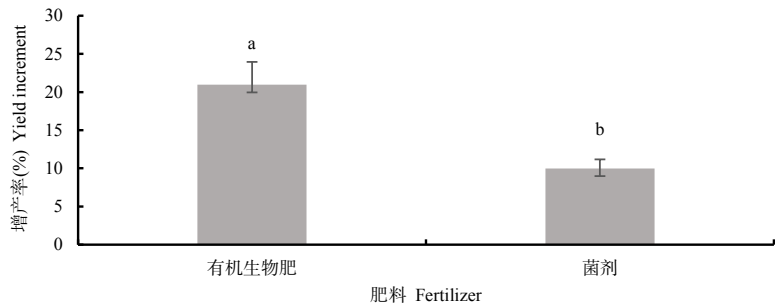


图2 减氮条件下生物有机肥和菌剂增产效果比较

Fig.2 Comparison of the effects between the bio-organic fertilizers and microbial inocula on maize yield increment in nitrogen fertilization reduction area

表5 磷肥减施区微生物肥料对玉米株高、生物量和叶面积的影响

Table 5 Effects of microbial fertilizers on plant height, biomass and leaf area in non-phosphorus area

年 份 Year	处 理 Treatment	不同生育时期的株高(cm) Plant height at different growth stages			不同生育时期地上部干重(g) Maize dry matter accumulation at different growth stages			不同生育时期叶面积(cm²) Leaf area at different growth stages	
		V5	V8	R1	V5	V8	R1	V5	V8
2018	BF1	38.1 ab	152 ab	232.0 ab	1.8 abcd	28.5 bcde	106 cdef*	—	3 454 abc
	BF2	39.0 ab	157 ab	230.0 ab	1.9 abcd	27.3 cde	102 def*	—	3 792 ab
	BF3	43.4 a*	166 a	239.0 ab	2.5 a*	36.0 ab*	122 abc*	—	4 124 ab
	BF4	42.2 a*	164 ab	234.0 ab	2.4 ab*	32.9 abcd*	114 abcde*	—	3 813 ab
	BF5	37.8 ab	148 ab	237.0 ab	1.7 abcd	24.9 de	111 bcde*	—	3 321 abc
	BF6	37.7 ab	149 ab	240.0 ab	1.6 bcd	27.2 cde	113 abcde*	—	3 191 abc
	BF7	43.7 a*	160 ab	242.0 ab	2.4 abc*	30.7 abcde	117 abcd*	—	4 295 a
	BF8	36.7 ab	141 b	231.0 ab	1.4 cd	23.8 e	106 cdef*	—	3 405 abc
	BF9	43.0 a*	167 a	248.0 a	2.3 abc*	38.1 a*	127 ab*	—	4 188 ab
	BF10	38.0 ab	146 ab	227.0 b	1.7 bcd	28.0 cde	93 fg	—	3 245 abc
	BF11	43.7 a*	154 ab	235.0 ab	2.1 abc*	31.1 abcde	104 def*	—	3 567 abc
	BF12	38.2 ab	150 ab	230.0 ab	1.7 abcd	26.6 cde	105 def*	—	3 336 abc
	BF13	39.8 ab	151 ab	229.0 ab	1.8 abcd	27.7 cde	97 efg	—	3 229 abc
	BF14	39.7 ab	150 ab	233.0 ab	1.7 bcd	25.1 de	100 defg	—	3 461 abc
	BF15	39.0 ab	147 ab	227.0 b	1.5 cd	25.5 cde	104 def*	—	3 082 bc
	CK	33.4 b	146 ab	225.0 b	1.1 d	24.0 e	85 g	—	2 539 bc
	NFT	48.9 a*	166 a	237.0 b	2.6 a*	33.3 abc*	1 290 a*	—	4 000 ab
2019	BF1	35.1 bed	107 cde	252.0 ab	1.2 bcde	21.7 def	108 abcd	135 cdefg	1 538 de
	BF2	37.0 abcd	107 cde	246.0 ab	1.4 bcd	25.2 cdef	88 cd	160 bcdef	1 545 de
	BF3	37.9 abcd	125 ab*	267.0 ab	1.7 ab*	36.8 ab*	110 ab*	176 bcde*	2 168 abc*
	BF4	40.9 ab*	123 ab*	266.0 ab	1.7 ab*	30.9 abcde*	118 ab*	209 ab*	2 265 ab*
	BF5	39.6 abc	119 abc*	264.0 ab	1.7 ab*	31.7 abcd*	100 bcd	195 bc*	2 034 bcd
	BF6	37.9 abcd	120 abc*	265.0 ab	1.6 abc	30.6 abcde*	112 abc	177 bcde*	2 010 bcd
	BF7	35.2 bcd	122 abc*	269.0 a	1.4 bcd	32.4 abc*	112 abc	140 cdefg	1 966 bcd
	BF8	28.0 e	97 e	260.0 ab	0.7 e	17.0 f	102 bcd	87 g	1 282 e
	BF9	39.6 abc	128 ab*	266.0 ab	1.7 ab*	35.3 abc*	127 a*	191 bcd*	2 172 abc*
	BF10	32.9 de	106 cde	260.0 ab	1.0 cde	21.2 ef	102 abcd	139 cdefg	1 516 de
	BF11	38.1 abcd	116 bcd	264.3 ab	1.3 bcde	27.2 bcdef	102 bcd	150 bcdef	1 785 bcde
	BF12	35.8 bcd	102 de	257.0 ab	1.0 cde	20.7 ef	97 bcd	113 fg	1 436 de
	BF13	34.3 cde	101 de	252.3 ab	1.0 cde	19.2 f	90 cd	134 defg	1 573 cde
	BF14	34.1 cde	97 e	254.7 ab	1.0 cde	18.5 f	92 cd	120 efg	1 258 e
	BF15	33.8 cde	97 e	241.3 b	0.9 de	16.8 f	86 d	111 fg	1 350 e
	CK	34.0 cde	103 de	250.0 ab	1.1 cde	19.9 f	91 cd	112 fg	1 545 de
	NFT	43.1 a*	133 a*	271.0 a	2.1 a*	40.7 a*	127 a*	251 a*	2 654 a*

2019年结果与CK相比,BF3、BF4和BF9处理显著促进拔节期株高、苗期和拔节期叶面积及3个时期的地上部干物质积累;BF5、BF6处理显著促进苗期叶面积和拔节期株高、地上部干物质增加,BF5处理在苗期显著促进地上干重的增加;BF7处理在拔节期对株高、地上干重有显著促进作用,其余9种菌肥3个时期促生效果均不显著。

综合两年研究结果,供试微生物肥料中有40%表现出促进苗期生长的效果,其中BF3、BF4、BF9处理两年效果稳定。两年平均,微生物肥料BF3、BF4、BF9主要通过地上干重促进玉米的生长,其次是株高、叶面积。在所有供试菌肥中效果最佳,2019年

效果明显好于2018年。

2.2.2 玉米产量和产量组成因素

相比NFT处理,不施磷肥条件下,第一年减产0.6%,第二年减产4.1%(表6)。2018年,所有处理的穗粒数无显著差异,相比CK处理,BF3、BF4、BF6、BF9和BF11处理的产量显著增加并与NFT处理相当,增产范围为17.9%~21.5%,BF3和BF4处理主要通过促进玉米百粒重来提高产量,BF6处理主要通过促进玉米收获穗数而提高产量。6种肥料促进玉米的百粒重提高,说明百粒重在玉米增产中起到重要作用。

表6 磷肥减施区微生物肥料对玉米产量及产量构成的影响

Table 6 Effects of microbial fertilizers on yield and yield components in non-phosphorus area

年 份	处 理	产 量	增产率	减产率(%)	收获穗数	穗粒数(粒)	百粒重(g)
Year	Treatment	(kg/ hm ²)	(%)	Yield reduction	(穗/hm ²)	Grain number	100-grain
		Yield	Yield growth rate	rate	Ear number	per ear	weight
2018	BF1	11 290 ab	4.4	—	55 303 d	526 ab	34.0 ab*
	BF2	12 067 ab	11.6	—	6 336 abc	490 b	34.0 ab*
	BF3	13 133 a*	21.5	1.0	61 364 abc	553 a	34.0 ab*
	BF4	12 970 a*	19.9	-0.2	64 394 ab	516 ab	34.2 ab*
	BF5	12 297 ab	13.7	—	62 121 abc	530 ab	32.7 bc
	BF6	12 837 a*	18.7	-1.2	65 909 a*	518 ab	33.0 bc
	BF7	12 367 ab	14.4	—	59 848 bc	542 ab	33.4 abc
	BF8	4 133 c	-61.8	—	18 939 e	542 ab	35.3 a*
	BF9	12 747 a*	17.9	-1.9	62 121 abc	539 ab	33.4 abc
	BF10	12 523 ab	15.8	—	60 606 bc	533 ab	34.0 ab*
	BF11	12 923 a*	19.5	-0.6	63 636 abc	529 ab	33.6 abc
	BF12	12 023 ab	11.2	—	61 364 abc	512 ab	33.5 abc
	BF13	12 217 ab	13.0	—	61 364 abc	534 ab	32.7 bc
	BF14	11 833 ab	9.4	—	61 364 abc	515 ab	32.8 bc
	BF15	11 733 ab	8.5	—	59 091 cd	517 ab	33.8 abc
	CK	10 813 b	0.0	—	59 848 bc	499 ab	31.8 c
	NFT	12 997 a*	20.2	—	65 873 a*	526 ab	32.9 bc
2019	BF1	10 833 ef	-1.8	—	62 346 abc	499 bc	37.3 g
	BF2	11 233 def	1.8	—	55 556 de	488 bc	39.0 cdefg
	BF3	12 400 ab*	12.4	-3.4	62 963 abc	567 a*	42.2 ab*
	BF4	12 233 abc*	10.9	-4.7	60 494 bed	543 ab	41.6 abcd*
	BF5	11 133 ef	0.9	—	58 642 cd	499 bc	38.9 defg
	BF6	11 800 bcde	7.0	—	61 111 bed	526 ab	39.5 bcdefg
	BF7	11 367 cdef	3.0	—	66 049 ab	500 bc	41.2 abcde*
	BF8	8 633 g	-21.8	—	51 852 e	510 abc	41.8 abcd*
	BF9	12 500 ab*	13.3	-2.6	65 432 ab	519 ab	41.5 abcd*
	BF10	10 800 ef	-2.1	—	61 728 bc	497 bc	37.8 g
	BF11	12 100 abcd*	9.7	-5.7	66 050 ab	512 abc	40.7 abcdef*
	BF12	11 067 ef	0.3	—	68 519 a	423 d	38.1 fg
	BF13	10 633 f	-3.6	—	62 963 abc	492 bc	38.6 efg
	BF14	11 067 ef	0.3	—	64 815 abc	452 bc	38.8 defg
	BF15	11 067 ef	0.3	—	58 642 cd	489 bc	37.7 g
	CK	11 033 ef	0.0	—	66 050 ab	492 bc	37.4 g
	NFT	12 833 a*	16.3%	0.0	66 667 ab	568 a*	42.7 a*

2019年分析结果表明,所有处理的收获穗数无显著差异。与CK处理相比,BF3、BF4、BF9和BF11处理的产量显著增加并与NFT相当,增产率为9.7~13.3%。BF3处理主要通过促进玉米百粒重和穗粒数的增加来提高产量,BF4、BF9和BF11处理通过促进百粒重而增产。两年产量及产量性状研究表明,供试微生物肥料中有33.3%表现出增产效果,其中BF3、BF4、BF9和BF11处理两年效果稳定。两年平均,BF3、BF4和BF9处理产量比CK增产12.4%~

21.5%、10.9%~19.9%、7%~18.7%、3%~14.4%、13.3%~17.9%,与正常施肥水平无显著差异。

2.2.3 减磷条件下生物有机肥与单施菌剂增产效果

减磷条件下供试微生物肥料中的生物有机肥处理玉米增产率为11.07%,高于单施菌剂处理5.64%(图3),处理间差异显著($P<0.05$)。在磷肥减施区生物有机肥玉米产量促生效果明显好于单一菌剂或复合菌剂处理,结果与氮肥减施区一致。

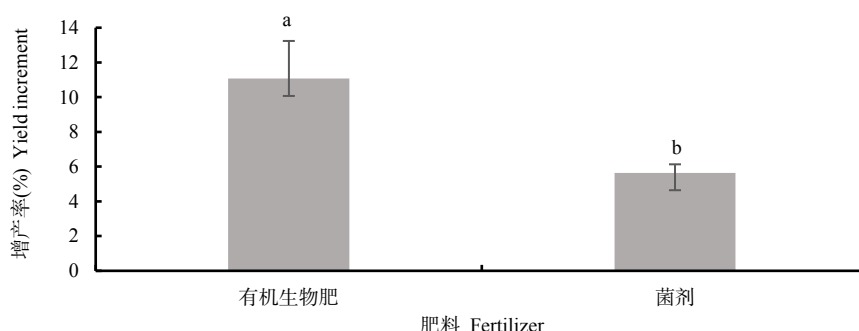


图3 减磷条件下生物有机肥和菌剂增产效果比较

Fig.3 Comparison between the effects of bio-organic fertilizers and microbial inocula on maize yield increment in non-phosphorus area

3 结论与讨论

关于含促生功能菌株(主要功能涉及固氮、溶磷、IAA)的微生物肥料对于玉米的节肥增产效果,前人已有一些研究报道。陈三凤等^[22]在减氮肥20%下接种固氮工程菌株,产量达到常规施肥产量水平。范作伟等^[23]用含溶磷微生物菌株与磷肥配施,减少1/3的化学磷肥用量的产量达到全量磷肥下产量水平。千淋兆等^[24]在不同减磷条件下,接种溶磷菌剂的处理比不接种菌剂的对照均增产显著,但未对减肥接种处理与正常施肥不接菌剂的产量进行统计分析,因此无法判断接种菌剂能减少的磷肥用量。Ahmad, et al.^[25]在减氮肥25%~50%下施用生物有机肥 [*Pseudomonas fluorescens* biotype G(N3), 可产生IAA]^[26],较全量氮肥显著增产12.1%~25.6%。综合两年的定位试验结果,在减少50%氮肥和不施磷肥条件下,施用生物有机肥玉米增产效果均显著高于单施菌剂处理,平均增产率分别20.95%、9.99% ($P<0.01$)和11.07%、5.64% ($P<0.05$)。施用生物有机肥BF3、BF4和BF9促生效果最好且稳定,分别增产25%~30%和15.4%~17%,说明这3种肥料具有广泛的减肥增效作用。生物有机肥BF6和BF7仅在氮肥减施区表现稳定增产,增产率分别为21%和25%。复合菌剂BF11(磷钾专用菌肥)仅在磷肥减施

区表现增产,增产率15%。其他微生物肥料作用效果不明显,BF8显著抑制玉米出苗和生长。供试微生物肥料中约有33.3%或26.7%在减氮肥或减磷肥土壤上表现出稳定增产作用。

前人有关微生物肥料的节肥研究多使用复合肥,且大多数肥料养分构成信息不详^[27~29]。本研究针对减氮肥和磷肥条件开展的微生物肥料评价研究,背景条件明确,研究表明,生物有机肥BF6、BF7表现出对背景条件的依赖性,两者在氮肥减施区对玉米促生效果整体好于磷肥减施区,显著促进产量增加,可能与两者中含有枯草芽孢杆菌的固氮^[30]和产生挥发性有机物刺激植物源IAA^[31]产生的功能相关。磷钾专用菌肥BF11仅在磷肥减施区显著促进产量的提高,可能与含有的胶冻样类芽孢杆菌^[32]和巨大芽孢杆菌^[33,34]的溶磷功能相关。因此,由于微生物肥料中主要菌种的生理功能存在差异,对于其不同土壤上的应用效果可能产生很大差异,微生物肥料的应用具有对生态环境和作物类型适应性,因此在目标种植区域对微生物肥料的进行适应性评价十分必要。

作物产量形成是不同生育时期植株生长发育累积的结果,受生育期内多种内在和外在因素的影响。因此,微生物肥料筛选以产量为中心,兼顾全生育期相关作物生长指标,明确其效应的主要作用时

期及重要性状。在氮肥减施区和磷肥减施区施用BF3、BF4、BF9生物有机肥,在苗期、拔节期、吐丝期对玉米生长均有明显促进作用(尤其株高和地上干重),最终表现在产量增加。此外生物有机成分既可以作为保持功能菌株活性的优良载体,可为玉米生长提供养分,也是相同功能菌株生物有机肥增产率显著高于单施菌剂的原因之一,因此,其促生效果在所有供试肥料中最佳、最稳定。有些肥料如BF5对苗期、拔节期玉米促生效果更突出,BF6更偏向在拔节期、吐丝期发挥促生作用,BF1、BF2、BF12、BF15仅在吐丝期表现出促生作用(磷肥减施区),说明微生物菌肥对玉米生育时期存在特异性,可能由菌肥自身特性决定。在增产机理方面,微生物肥料处理产量的增加主要取决于玉米百粒重增加,其次是穗粒数。说明微生物肥料增产的一个重要原因可能是通过维持玉米子粒灌浆期的生长活力,促进子粒生长,需要进一步生理学分析。综合本研究结果,筛选出3种高效微生物菌肥BF3、BF4、BF9,它们与东北黑土性质及相应气温降雨条件匹配性最好,推荐在玉米生产上应用,实现减施氮、磷肥的目的。

参考文献:

- [1] 闫 湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.
Yan X, Jin J Y, Liang M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China[J]. Soils, 2017, 49(6): 1067-1077. (in Chinese)
- [2] 孙建利.对过量使用化肥危害的思考[J].现代农业科技,2010,534(16):278-279.
Sun J L. Thoughts on the harm of overusing chemical fertilizer[J]. Modern Agricultural Technology, 2010, 534(16): 278-279. (in Chinese)
- [3] 刘兆辉,薄录吉,李 彦,等.氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J].中国土壤与肥料,2016(4):1-8.
Liu Z H, Bo L J, Li Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer reduction on crop yield and ecological environment: a review[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(4): 1-8. (in Chinese)
- [4] Hoorman J J, Islam R. Understanding soil microbes and nutrient recycling[J]. Agriculture and Natural Resources, 2010, 16: 1-5.
- [5] Vacheron J, Desbrosses G, Bouffaud M L, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 356.
- [6] Teotia P, Kumar V, Kumar M, et al. Probiotic microbiome: potassium solubilization and plant productivity[J]. Probiotics in Agroecosystem, 2017: 451-467.
- [7] Berendsen R L, Pieterse C M, Bakker P A. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends Plant Science, 2012, 17(8): 478-86.
- [8] Ilangumaran G, Smith D L. Plant growth promoting rhizobacteria in amelioration of salinity stress: a systems biology perspective[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1768.
- [9] Vurukonda S S K P, Vardharajula S, Shrivastava M, et al. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Microbiological Research, 2015, 184: 13-24.
- [10] Pineda A, Kaplan I, Bezemer T M. Steering soil microbiomes to suppress aboveground insect pests[J]. Trends in Plant Science, 2017, 9(22): 770-778.
- [11] 马军妮.放线菌对玉米小麦的促生抗旱作用及机理研究[M].陕西:西北农林科技大学,2016.
- [12] 葛 诚,吴 薇.我国微生物肥料的生产、应用及问题[J].中国农学通报,1994,10(3):24-28.
Ge C, Wu W. Production, application and problems of microbial fertilizer in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1994, 10(3): 24-28. (in Chinese)
- [13] Cassan F, Diaz-zorita M. *Azospirillum* sp. in current agriculture: from the laboratory to the field[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 117-130.
- [14] 李 俊,姜 昕,马鸣超,等.我国微生物肥料产业需求与技术创新[J].中国土壤与肥料,2019(2):1-5.
L J, Jiang X, Ma M C, et al. Development demand and technical innovation for bio-fertilizer industry in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 1-5. (in Chinese)
- [15] 王国基,张玉霞,姚 拓,等.玉米专用肥料研制及其部分替代化肥施用对玉米生长的影响[J].草原与草坪,2014,34(4):1-7.
Wang G J, Zhang Y X, Yao T, et al. Development and application of specialized biofertilizer for maize[J]. Grassland and Turf, 2014, 34(4): 1-7. (in Chinese)
- [16] 荣良燕,姚 拓,黄高宝,等.植物根际优良促生菌(PGPR)筛选及其接种剂部分替代化肥对玉米生长影响研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):59-65.
Rong L Y, Yao T, Huang G B, et al. Screening of plant growth promoting rhizobacteria strains and effects of inoculant on growth of maize by replacing part of chemical fertilizers[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2): 59-65. (in Chinese)
- [17] 陈 龙,姚 拓,柴 强,等.微生物肥料替代部分化学肥料对玉米生长及品质的影响[J].草原与草坪,2016,36(1):20-30.
Chen L, Yao T, Chai Q, et al. Effect of chemical fertilizer partly replaced by microbial fertilizer on maize growth and quality[J]. Grassland and Turf, 2016, 36(1): 20-30. (in Chinese)
- [18] 杜延全.微生物肥料替代部分化学肥料对玉米生长及品质的影响探究[J].农业与技术,2018,38(4):33.
Du Y Q. Study on the effect of chemical fertilizer partly replaced by microbial fertilizer on maize growth and quality[J]. Agriculture & Technology, 2018, 38(4): 33. (in Chinese)
- [19] 孙淑荣,吴海燕,刘春光,等. PGPR复合制剂对玉米增产效果的研究[J].吉林农业科学,2004,29(5):22-28.
Sun S R, Wu H Y, Liu C G, et al. Study on effect of PGPR compound on yield of corn[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2004, 29(5): 22-28. (in Chinese)
- [20] 石东峰.东北雨养区春玉米秸秆覆盖条耕技术研究[M].北京:中国农业大学,2018.
- [21] 伍大利.滴灌施肥对春玉米产量、养分水分利用效率及根系分布的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
- [22] 陈三凤,李季伦,姚腾云,等.玉米联合固氮工程菌的增产和节

- 约氮肥的效果[J]. 土壤肥料, 2002(1): 37-40.
- Chen S F, Li J L, Yao T Y, et al. Effect of increasing maize yields and saving nitrogen fertilizer by inoculation of *Azospirillum brasilense* UB37[J]. Soils and Fertilizers, 2002(1): 37-40. (in Chinese)
- [23] 范作伟, 胡会军, 金荣德, 等. 溶磷生物肥料在玉米上的施用效果及其对土壤、植株磷素效率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 122-126.
- Fan Z W, Hu H J, Jin R D, et al. Applications of dissolved phosphorus bio-fertilizer in maize and the effects of that on soil and plant phosphorus efficiency[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(6): 122-126. (in Chinese)
- [24] 千淋兆, 龚明波, 顾金刚, 等. 溶磷微生物菌剂对土壤营养元素及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(5): 425-431.
- Qian L Z, Gong M B, Gu J G, et al. Effects of phosphate-solubilizing microbial inoculums on soil nutrients and corn growth[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(5): 425-431. (in Chinese)
- [25] Ahmad R, Arshad M, Khalid A, et al. Effectiveness of organic-/bio-Fertilizer supplemented with chemical fertilizers for improving soil water retention, aggregate stability, growth and nutrient uptake of maize(*Zea mays* L.)[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2008, 31(4): 57-77.
- [26] Shaharoona B, Arshad M, Zahir Z A, et al. Performance of *pseudomonas* spp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize(*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(9): 2971-2975.
- [27] 王国基, 柴强, 张玉霞, 等. 干旱区玉米专用菌肥对玉米生长特性的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(1): 173-179.
- Wang G J, Chai Q, Zhang Y X, et al. Effects of maize special biofertilizer on maize growth in arid area[J]. Acta Agraria Sinica, 2015, 23(1): 173-179. (in Chinese)
- [28] 杨富, 李荫藩, 王慧, 等. 微生物菌肥拌种及减少化肥用量对燕麦生长的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 135-138.
- Yang F, Li Y F, Wang H, et al. Oats growth under microbial fertilizer seed dressing and reducing the amount of chemical fertilizer[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(3): 135-138. (in Chinese)
- [29] 王豹祥, 李富欣, 张朝辉, 等. 应用PGPR菌肥减少烤烟生产化肥的施用量[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 813-822.
- Wang B X, Li F X, Zhang Z H, et al. Effect of application of PGPR on chemical fertilizer application rate for flue-cured tobacco[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 813-822. (in Chinese)
- [30] 赵雅峰, 李春, 沈乾炜, 等. 产酸克雷伯氏菌Rs-5与枯草芽孢杆菌组合BCL-8复配对棉花的解盐促生作用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6103-6105.
- Zhao Y F, Li C, Shen Q W et al. Salt-stress relieving and growth-promoting action of compound combination of acid-producer *Klebsiella oxytoca* Rs-5 and *Bacillus subtilis* Combination BCL-8 on Cotton[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(12): 6103-6105. (in Chinese)
- [31] 谢越盛, 许泉, 王大成, 等. 植物根际促生枯草芽孢杆菌JC01筛选[J]. 微生物学通报, 2016, 43(10): 2187-2196.
- Xie Y S, Xu Q, Wang D C, et al. Screening of plant growth-promoting *Bacillus subtilis* JC01 producing volatile organic compound[J]. Microbiology China, 2016, 43(10): 2187-2196. (in Chinese)
- [32] 任月. 噻虫嗪对胶冻样类芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌的拮抗作用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(5): 1-5.
- Ren Y. Antagonistic effect of thiamethoxam against *Patuobacillus mucilaginous*, *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(5): 1-5. (in Chinese)
- [33] 吕黎, 王蕾, 周佳敏, 等. 巨大芽孢杆菌的研究现状及应用[J]. 农业科学研究, 2014(3): 48-52.
- Lü L, Wang L, Zhou J M et al. Research status and application of *Bacillus megaterium*[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2014(3): 48-52. (in Chinese)
- [34] 孙丽范. 利用耐盐碱解磷、解钾、固氮菌发酵菌糠制备菌肥的研究[D]. 天津大学, 2012.

(责任编辑:姜媛媛)