蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响

徐 宪 斌

(德州市农业科学研究院，山东 德州 253015)

摘 要：[目的] 探讨蚯蚓粪与化肥配施对玉米根际土壤生物学性状的作用效果，为土壤培肥制度的建立与玉米的合理施肥提供理论依据。[方法] 通过大田试验，研究 CF(单施化肥)、VC(蚯蚓粪)与 VC+CF(蚯蚓粪和化肥各提供 50%的氮)等处理对玉米根系分泌物、根际土壤微生物数量、酶活性与腐殖质组成的影响。[结果] 同 CF 处理相比，VC+CF 处理显著提高了根系分泌物含量，并明显提高了根际土壤中微生物数量、微生物量碳含量及脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶活性，其中细菌数分别较 CK，CF 与 VC 处理提高 124.32%，62.99%和 15.45%，脲酶活性分别高出 44.27%，23.53%和 12.50%。此外，VC+CF 处理亦显著提高了根际土壤中胡敏酸、富里酸含量和胡/富比。同 VC+CF 处理相比，VC 处理对玉米根际土壤生物学特征的影响较小。[结论] 蚯蚓粪与化肥配施能较好地改善玉米根际区域的微生态环境。

关键词：玉米；蚯蚓粪；根系分泌物；土壤酶；腐殖质

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)01-0078-05 **中图分类号**：S154.34

文献参数：徐宪斌. 蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报，2017，37(1)：078-082. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.014；XU Xianbin. Effects of vermicompost co-applied with inorganic fertilizer on soil biological characteristics in rhizosphere of maize[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(1)：078-082. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.014

Effects of Vermicompost Co-applied with Inorganic Fertilizer on Soil Biological Characteristics in Rhizosphere of Maize

XU Xianbin

(*Dezhou Academy of Agricultural Science*, *Dezhou*, *Shandong* 253015, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to explore the effect of vermicompost co-applied with inorganic fertilizer on biological characteristics in rhizosphere soil of maize and to provide theoretical basis for the development of the soil fertilizer system and reasonable fertilization of corn. [Methods] A field experiment was conducted to determine the effect of four treatments, CK(neither urea nor vermicompost was applied), CF(100% of nitrogen was provided by urea), VC(100% of nitrogen was provided by vermicompost), and VC+CF (50% and 50% of nitrogen was provided by vermicompost and urea, respectively) on root exudates, microorganism population, enzyme activities and humus composition in the rhizosphere soil of maize. [Results] The VC+CF treatment significantly increased root exudates, and microorganism population, microbial biomass carbon, as well as the enzyme activities of urease, invertase, catalase and neutral phosphatase compared with CF treatment. The bacterial population increased by 124.32%, 62.99% and 15.45%, and the urease enzyme activity increased by 44.27%, 23.53% and 12.50% compared with the treatments of CK, CF and VC, respectively. In addition, the VC+CF treatment also obviously increased the contents of humic acid and fulvic acid, and the ratio of humic acid to fulvic acid. However, effect on biological properties in rhizosphere soil of maize in VC treatment was less than that in VC+CF treatment. [Conclusion] In summary, vermicompost co-applied with inorganic fertilizer had better effect on micro-ecological environment in rhizosphere soil of maize.

Keywords: **maize**; **vermicompost**; **root exudate**; **soil enzyme**; **humus**

收稿日期：2016-03-15 **修回日期**：2016-07-25

资助项目：山东省科技发展计划项目“鲁西北地区新型日光温室及其蔬菜生产关键技术研究集成与示范”(2012GNC11108)

第一作者：徐宪斌(1964—)，男(汉族)，山东省宁津县人，本科，高级农艺师，主要从事作物栽培技术研究。E-mail：xuxianbin007@126.com。

全球变化是当前世界瞩目的重要领域,其中气候变暖与大气氮沉降是人们的关注焦点[1]。化肥的大量施用导致氮循环速率明显加快[2],并使土壤的固氮能力、碳/氮比及理化环境亦发生变化,显著影响土壤微生物数量与群落多样性[3]。据统计[4],2011 年中国化肥的施用量高达 6.03×10^7 t,平均施用量是发达国家化肥安全施用上限的 2 倍。但是,主粮作物的肥料利用效率却呈现出下降趋势。目前,中国主粮作物的氮肥利用率只有 27.5%[5]。大量试验表明,长期单施化肥能使土壤板结、酸化,引起土壤养分流失,而过量施用化肥势必会加剧这些问题[5-7]。针对以上情况,国内外许多学者做了大量探索研究,发现有机肥的施用能明显缓解由于过量施用化肥所引起的土壤酸化、养分流失等问题,且能显著增加土壤有效养分,促进微生物快速繁殖,增强保水、保肥性能[8-9]。但有研究表明[10],单施有机肥虽然有助于土壤的可持续利用,却存在增产效果较低的弱点,而将有机肥与化肥搭配施用则是比较理想的措施。

蚯蚓粪是通过蚯蚓消化有机废弃物而产生的均匀颗粒,具有良好的团粒结构,疏松适度,通透性好,并有较强的保水与保肥能力;同时含有多种有利于植物生长的腐殖质、植物激素与酶类物质[11]。中国从 20 世纪 80 年代已开始快速发展蚯蚓养殖业,北京、云南、宁夏等地均建有不同规模的蚯蚓养殖场,蚯蚓粪年产量高达数十万吨[12]。前人针对蚯蚓粪开展大量的研究,但主要集中于黄瓜、草莓、花卉等作物[12-14],而应用于玉米的研究报道相对较少,尤其关于玉米根际土壤微生物、酶活性及腐殖质组成的研究报道甚少。土壤微生物是土壤生态系统中养分源与汇的一个巨大原动力,在土壤养分循环和平衡、土壤理化性状改善及生态系统的可持续发展中发挥着至关重要的作用[7]。土壤酶活性作为评价土壤质量变化的预警与敏感指标,可表征土壤的养分转化进程与综合肥力特性[15]。而腐殖质是土壤有机质的主体部分,既能作为营养元素的“库”,还可影响土壤的矿物成分,其组成是衡量土壤肥力水平的关键指标[16]。为此,本研究拟选用经蚯蚓吞食牛粪后产生的蚓粪为供试原料,开展了蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的研究,旨在为土壤培肥制度的建立与玉米的合理施肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点与供试材料

试验地点设在德州市运河经济开发区芦庄村九龙湾生态园,供试土壤为壤土,土壤速效 N,P,K 含量分别为 95.26,36.07,98.39 mg/kg,有机质含量为 13.62 g/kg。供试蚯蚓粪为蚯蚓吞食牛粪后的产物,全量 N,P 和 K 含量分别为 1.55%,1.12%和 0.87%;有机碳含量为 187.05 g/kg;有益菌群≥1.8 亿个/g;氨基酸总量为 5.42%,其所含氨基酸种类在 16～18 种;pH 值 6.8。所用化肥为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和硫酸钾(含 K_2O 50%)。玉米采用冬小麦—夏玉米轮作模式,其中玉米品种为中农 99(ZN99)。

1.2　试验设计

采用田间小区试验,小区面积为 136 m^2(8.5 m×16 m)。共设 4 个处理:① 不施肥(CK);② 单施化肥(CF);③ 蚯蚓粪(VC);④ 蚯蚓粪和化肥各提供 50%的氮(VC+CF)。每个处理重复 5 次,共计 20 个小区,处理随机排列。除 CK 外,各处理均为等养分量,N,P 和 K 含量相当于 260.85,212.35,196.50 kg/hm^2,各处理 P 和 K 不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。全部有机肥作为基肥于播种前一次性深施;无机肥处理的尿素分 2 次施用,其中 50%作为基肥播种时施入,剩余 50%在大口期开沟追施。

玉米种植密度为 52 000 株/hm^2,播种行距和株距分别为 55 cm 和 35 cm。于 2015 年 6 月 16 日播种,9 月 29 日收获,整个玉米生育期共 106 d。

1.3　测定项目与方法

2015 年 9 月 29 日(成熟期)采集土壤样品。在土壤水分含量适中时利用剥落分离法[17]采集根际土,并将所取根际土壤样品充分混匀后分为 2 份:一份新鲜土样于 4 ℃冰箱避光保存,尽快测定微生物数量和微生物量碳、氮;另一份样品风干,过 1 mm 筛后用于根系分泌物、土壤酶活性及腐殖质组成的分析。

根系分泌物中氨基酸总量的测定采用甲醛滴定法;有机酸总量的测定采用液相色谱仪法;总糖的测定采用蒽酮比色法[18]。土壤微生物数量采用稀释平板计数法,细菌采用牛肉蛋白胨琼脂培养基;放线菌采用改良高氏 1 号培养基;真菌采用马丁—孟加拉红培养基[7]。土壤微生物量碳的测定采用氯仿熏蒸 K_2SO_4 浸提法[19]。土壤脲酶活性的测定采用靛酚蓝比色法;蔗糖酶活性的测定采用 3,5—二硝基水杨酸比色法;过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法;中性磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法[20]。腐殖质各组分的测定采用焦磷酸钠提取—重铬酸钾氧化法:首先用重铬酸钾氧化法测定腐殖质全碳,并用氢氧化钠—焦磷酸钠混合液制备待测液,然后用重铬酸钾氧化法分别测定胡敏酸+富里酸的总碳量以及胡敏酸碳量,最后采用差值法即可分组[21]。

1.4 统计方法

采用Excel 2013处理数据并制图，采用SAS软件进行方差分析和多重比较(LSD法，$p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物

由表1可以看出，施用蚯蚓粪的2个处理的氨基酸总量、有机酸总量与总糖含量显著高于CK与CF处理，其中VC+CF处理的有机酸总量和总糖含量明显高于其他处理，而氨基酸含量与VC处理差异未达显著水平，分别较CK显著提高57.38%，91.81%和68.20%，分别较CF处理显著提高45.87%，52.23%和74.83%。同CK相比，CF处理显著提高了有机酸总量，而对氨基酸总量与总糖含量的影响则较小。以上分析可见，不同施肥处理对玉米根系分泌物含量的影响呈现出明显差异，施入蚯蚓粪较单施化肥可明显增加玉米根系分泌物含量，其中配施蚯蚓粪处理的效果最显著。

2.2 根际土壤微生物数量

玉米根际土壤中细菌、放线菌与真菌所占微生物总量的比例分别为61.31%～77.48%，21.79%～37.77%和0.83%～0.92%，可见细菌占绝对优势，放线菌次之，而真菌最少(表2)。与对照相比，各施肥处理能明显增加根际土壤的细菌数、真菌数与微生物总量，而对放线菌数无显著影响。

表1 不同处理对玉米根系分泌物含量的影响

处 理	氨基酸总量/($\mu g \cdot kg^{-1}$)	有机酸总量/($mg \cdot g^{-1}$)	总糖/($mg \cdot kg^{-1}$)
CK	311.52 ± 13.28^{b}	20.15 ± 0.82^{d}	13.71 ± 0.65^{c}
CF	336.09 ± 19.15^{b}	25.39 ± 1.52^{c}	13.19 ± 0.29^{c}
VC	469.36 ± 10.23^{a}	31.92 ± 1.16^{b}	18.25 ± 0.31^{b}
VC+CF	490.27 ± 15.62^{a}	38.65 ± 0.69^{a}	23.06 ± 0.58^{a}

注：数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

在各施肥处理中，VC与VC+CF处理的细菌数、真菌数和微生物总量显著高于CF处理；而VC+CF处理的细菌数、微生物总量均显著高于其他处理，其中细菌数分别比CK，CF与VC处理明显提高124.32%，62.99%和15.45%。

表2 不同处理对玉米根际土壤微生物数量与微生物量碳含量的影响

处 理	细菌/($10^4 CFU \cdot g^{-1}$)	放线菌/($10^4 CFU \cdot g^{-1}$)	真菌/($10^4 CFU \cdot g^{-1}$)	微生物总量/($10^4 CFU \cdot g^{-1}$)	微生物量碳/($mg \cdot kg^{-1}$)
CK	375.22 ± 15.39^{d}	231.16 ± 21.45^{a}	5.65 ± 0.09^{c}	612.03 ± 10.66^{d}	309.42 ± 15.46^{d}
CF	516.39 ± 22.65^{c}	238.08 ± 12.73^{a}	6.32 ± 0.40^{b}	760.79 ± 26.29^{c}	381.65 ± 26.15^{c}
VC	729.05 ± 18.10^{b}	247.92 ± 15.11^{a}	7.59 ± 0.26^{a}	984.56 ± 18.05^{b}	465.28 ± 12.39^{b}
VC+CF	841.68 ± 13.26^{a}	236.75 ± 10.52^{a}	7.86 ± 0.19^{a}	1086.29 ± 15.37^{a}	542.87 ± 18.23^{a}

由表2还可见，不同处理微生物量碳含量的大小次序为：VC+CF＞VC＞CF＞CK，且各个处理间差异均达显著水平，其中VC+CF处理分别较CK，CF与VC处理显著高出75.45%，42.24%和16.68%。以上分析认为，施用蚯蚓粪较单施化肥可显著提高玉米根际土壤的微生物数量与微生物量碳含量，其中蚯蚓粪配施化肥的效果更优。

2.3 根际土壤酶活性

由表3可以看出，各处理脲酶和蔗糖酶活性的大小次序为：VC+CF＞VC＞CF＞CK，且处理间差异均达显著水平，可见，VC+CF处理的脲酶和蔗糖酶活性显著高于其他处理，其中脲酶活性分别较CK，CF和VC处理明显高出44.27%，23.53%和12.50%。VC+CF处理的过氧化氢酶活性与VC处理无显著性差异，但显著高于CK和CF处理。

从表3还可知，VC+CF处理的中性磷酸酶活性亦最高，并显著高于其他处理，其次为VC处理，也明显高于CK和CF处理，而CK与CF处理间差异不显著。数据表明，蚯蚓粪与化肥配施处理的脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和中性磷酸酶活性均显著高于单施化肥。

表3 不同处理对玉米根际土壤酶活性的影响

处 理	脲酶/($mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	蔗糖酶/($ml \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	过氧化氢酶/($ml \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	中性磷酸酶/($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)
CK	1.31 ± 0.08^{d}	1.72 ± 0.06^{d}	0.79 ± 0.09^{c}	1.76 ± 0.08^{c}
CF	1.53 ± 0.02^{c}	1.98 ± 0.10^{c}	1.16 ± 0.05^{b}	1.78 ± 0.05^{c}
VC	1.68 ± 0.07^{b}	2.26 ± 0.05^{b}	1.27 ± 0.03^{a}	2.10 ± 0.08^{b}
VC+CF	1.89 ± 0.05^{a}	3.39 ± 0.18^{a}	1.32 ± 0.05^{a}	2.46 ± 0.07^{a}

2.4　根际腐殖质组成

从表 4 可以看出,各个处理的胡敏酸含量并未表现出明显的差异;VC+CF 处理的腐殖酸碳、胡敏酸碳和富里酸碳均最高,并显著高于其他处理,其中胡敏酸碳分别较 CK,CF 和 VC 处理显著提高 42.96%,30.41%和 22.93%;而 CK,CF 和 VC 处理间的腐殖酸碳、胡敏酸碳和富里酸碳差异均未达显著水平。同时,VC+CF 处理较 CK 显著降低了胡敏素碳与腐殖酸碳的比值,而 CF,VC 与 CK 无显著性差异。从表 4 还可知,VC+CF 处理的 HA/FA 比值最大,分别比 CK,CF 和 VC 处理明显高出 23.35%,12.51%和 7.82%;依次为 VC 和 CF 处理,两者间差异不显著,但均显著高于 CK。

综合分析可知,蚯蚓粪配施化肥处理较单施化肥能明显提高胡敏酸碳和富里酸碳含量,并显著增加 HA/FA 比值。

表 4　不同处理对玉米根际土壤腐殖质组分的影响

处 理	胡敏素碳/(g·kg^{-1})	腐殖酸碳/(g·kg^{-1})	胡敏素碳/腐殖酸碳	胡敏酸碳/(g·kg^{-1})	富里酸碳/(g·kg^{-1})	胡富/HA/FA
CK	9.28±0.15^{a}	3.16±0.29^{b}	2.94±0.10^{a}	1.35±0.19^{b}	1.81±0.06^{b}	0.75±0.03^{c}
CF	9.21±0.32^{a}	3.29±0.08^{b}	2.80±0.09^{a}	1.48±0.23^{b}	1.81±0.03^{b}	0.82±0.02^{b}
VC	9.39±0.17^{a}	3.41±0.19^{b}	2.75±0.16^{a}	1.57±0.08^{b}	1.84±0.03^{b}	0.85±0.03^{b}
VC+CF	9.33±0.26^{a}	4.02±0.22^{a}	2.32±0.05^{b}	1.93±0.12^{a}	2.09±0.05^{a}	0.92±0.02^{a}

3　讨 论

根际是植物—土壤—微生物相互作用的特殊微生态环境,根际微生物数量和种类是表征土壤肥力的重要生物学指标[22]。本试验研究表明,施用蚯蚓粪处理较对照和单施化肥能显著提高玉米根际土壤细菌数、真菌数和微生物总量。这说明施用蚯蚓粪可促进土壤微生物生长,主要是由于大部分微生物在土壤中实际上处于一种低营养状态,当蚯蚓粪加入土壤后,为微生物提供了新的能源,使微生物在种群数量上发生较大的改变;另一方面,蚯蚓粪本身也带入大量活的微生物,施入蚯蚓粪在某种程度上起到了"接种"的作用[7]。同时,本研究发现,蚯蚓粪处理对根际土壤放线菌数并未产生显著影响,这与井大炜等[23]关于西瓜根际土壤微生物的研究结果不完全一致,造成这一差异可能与作物种类、土壤性状和试验周期等因素有关。

土壤酶是土壤系统内动物、植物和微生物残体或活体,通过催化土壤生化反应发挥重要作用,是表征土壤肥力和土壤生物活性重要指标[20]。土壤酶直接影响土壤能量代谢、物质转化及养分释放和固定,与土壤肥力高低密切相关[15]。不同施肥处理会影响土壤微生物区系构成、生物量和代谢过程,改变土壤酶活性。本试验得出,施用蚯蚓粪可明显提高根际土壤酶活性,这与前人的研究结论[24-25]相类似,主要是因为蚯蚓粪有利于改善土壤理化性状,调节土壤 C/N,促进作物与土壤微生物的生长,而且蚯蚓粪能为土壤酶提供丰富的酶促基质,发挥底物诱导作用,从而有助于土壤酶活性的提高[13]。此外,蚯蚓粪与化肥配施处理的微生物数量与土壤酶活性均明显高于蚯蚓粪处理。这可能是由于配施蚯蚓粪能更好地调节土壤碳氮比,从而为微生物活动与酶活性的提高创造了优越的条件。同时,植物根系具有很强的合成功能,能够合成氨基酸、植物碱和维生素等,且在植物的整个生长期间进行着很活跃的代谢作用,向根外分泌无机和有机物质,即根系分泌物[25]。本研究表明,配施蚯蚓粪处理较单施化肥可显著提高玉米根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量与总糖含量,这与刘方春等[22]在冬枣上的研究结论基本一致。可见,根系分泌物含量的提高也是增加土壤微生物数量和增强酶活性的重要原因之一。此外,有机酸总量的提高能降低根际土壤 pH 值,这有利于增强 P,K 与部分盐类离子的溶解性,从而可提高根际土壤中养分离子的有效性[20],促进玉米对磷和钾的吸收,对于玉米产量和品质的提高具有积极意义。

腐殖质是土壤有机质的主体部分,是评价土壤肥力水平的重要指标之一,而腐殖酸与胡/富比是其核心部分[26]。有研究表明[16],有机—无机配施可以增加胡敏酸与富里酸的含量,而有机肥显著补充了胡敏酸,或是矿化消耗的富里酸多于胡敏酸,从而升高了胡/富比值。本研究认为,配施蚯蚓粪处理比单施化肥明显提高了玉米根际土壤中胡敏酸、富里酸含量和胡/富比。这与朱青藤等[27]在白土土壤上的研究结论相似。可能是由于施用蚯蚓粪明显改善了玉米根系的形态特征[28],且增强了根系活性,从而促使根系分泌物增多;也可能与根际土壤微生物数量和土壤酶活性的提高有一定关联;同时,微生物本身活动的加剧可导致细胞死亡并加速残体的分解,可能是引起胡

敏酸增加的原因之一。而部分根系的腐解与脱落亦可能会改变土壤腐殖质的组成成分[28]。

4 结论

与单施化肥相比，蚯蚓粪与化肥配施处理能显著提高玉米根系分泌物含量，并明显提高了根际土壤中微生物数量、微生物量碳含量及脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶活性；同时，配施蚯蚓粪处理亦显著提高了玉米根际土壤中胡敏酸、富里酸含量和胡/富比。同配施蚯蚓粪处理相比，蚯蚓粪处理对玉米根际土壤生物学特征的影响较小。综上所述，蚯蚓粪与化肥配施能较好地改善玉米根际区域的微生态环境。

[参 考 文 献]

[1] 王方超，邹丽群，唐静，等. 氮沉降对杉木和枫香土壤氮磷转化及碳矿化的影响[J]. 生态学报，2016，36(11)：3226-3234.

[2] 王敬，程谊，蔡祖聪，等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报，2016，53(2)：292-304.

[3] 杨馨逸，刘小虎，韩晓日. 施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J]. 中国农业科学，2016，49(13)：2561-2571.

[4] 段鹏鹏，丛耀辉，徐文静，等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(23)：4717-4727.

[5] 郝小雨，周宝库，马星竹，等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. 农业工程学报，2015，31(16)：178-185.

[6] 陈安强，付斌，鲁耀，等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报，2015，31(21)：160-167.

[7] 万水霞，唐杉，蒋光月，等. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J]. 草业学报，2016，25(6)：109-117.

[8] 米迎宾，杨劲松，姚荣江，等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]土壤学报，2016，53(3)：612-620.

[9] 郭金瑞，宋振伟，朱平，等. 长期不同种植模式对东北黑土微生物群落结构与土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报，2016，47(2)：353-359.

[10] 高洪军，彭畅，张秀芝，等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(23)：4790-4799.

[11] 李欢，向丹，李晓林，等. 蚯蚓粪和生物有机肥对土壤养分及夏玉米产量的调控作用[J]. 土壤通报，2011，42(5)：1179-1183.

[12] 胡艳霞，孙振钧，孙永明，等. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. 应用生态学报，2004，15(8)：1358-1362.

[13] 田给林，张潞生. 蚯蚓粪缓解草莓连作土壤障碍的作用[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(3)：759-767.

[14] 程世平，施江，史国安，等. 不同配比蚯蚓粪对桂圆菊生长发育的影响[J]. 北方园艺，2010(17)：62-64.

[15] 孔涛，刘民，马瑜，等. 黄瓜产量及土壤酶活性对基于古龙酸母液与废弃培养基有机肥的响应[J]. 环境化学，2015，34(12)：2275-2280.

[16] 吴萍萍，王家嘉，李录久. 不同施肥措施对白土腐殖质组成的影响[J]. 土壤，2016，48(1)：76-81.

[17] Wang Xiaoping, Zabowski D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions[J]. Plant Soil, 1998，200：13-20.

[18] 顾美英，唐光木，刘洪亮，等. 施用棉秆炭对新疆连作棉花根际土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(1)：173-181.

[19] 井大炜，邢尚军，刘方春，等. 畦灌配施保水剂改善杨树林下土壤物理性状提高微生物活性[J]. 农业工程学报，2015，31(14)：116-122.

[20] 杨林生，张宇亭，黄兴成，等. 长期施用含氯化肥对稻—麦轮作体系土壤生物肥力的影响[J]. 中国农业科学，2016，49(4)：686-694.

[21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.

[22] 刘方春，邢尚军，马海林，等. 根际促生细菌(PGPR)对冬枣根际土壤微生物数量及细菌多样性影响[J]. 林业科学，2013，49(8)：75-80.

[23] 井大炜，张红，王明友. 牛粪对西瓜根际土壤微生物多样性及氮素利用率的影响[J]. 核农学报，2014，28(11)：2102-2107.

[24] 王文锋，李春花，黄绍文，等. 不同施肥模式对设施秋冬茬芹菜生育期间土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(3)：676-686.

[25] 井大炜，邢尚军，刘方春，等. 保水剂—尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(4)：1046-1052.

[26] 张艳鸿，窦森，董珊珊，等. 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响[J]土壤学报，2016，53(3)：694-702.

[27] 朱青藤，申连玉，钱黎慧，等. 有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2015，21(2)：396-403.

[28] 刘镜波，王小林，张岁岐，等. 有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响[J]. 水土保持通报，2011，31(6)：32-36.