

张 奇,张振华,陈雅玲,等.施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(15):71-76.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.15.012

施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展

张 奇^{1,2},张振华²,陈雅玲³,卢 信²

(1.扬州大学环境科学与工程学院,江苏扬州 225009; 2.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏南京 210014;
3.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095)

摘要:生物有机肥是利用动植物残体作为发酵底物,经无公害处理后,添加某些特定有益微生物,腐熟处理后生产出的一种肥料。本文概述了生物有机肥对土壤理化性质的作用效果,以及对作物产量、品质的影响,同时指出了我国生物有机肥应用中存在的问题,并提出了相应的解决办法。

关键词:生物有机肥;土壤理化性质;微生物;作物品质;产量

中图分类号: S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)15-0071-06

生物有机肥具有营养多样性和绿色无害性的优势和特点,但实际使用过程中生物有机肥的推广一直不理想,很大一部分原因是人们对生物有机肥的了解不多。本文主要总结有机肥的生产、分类、特点,着重综述施用生物有机肥对土壤特性和作物品质、产量影响的研究进展,并指出生产和应用中的问题,提出了后续研究的重点。

1 化肥的使用现状及存在的问题

自 20 世纪 50 年代起,化肥在我国被逐渐推广应用,化肥的施用对我国农业增产增收效果显著,但存在的潜在危害也逐渐显现。据统计,1979 年我国化肥的使用数量为 10.86 万 t,2013 年激增到 59.12 万 t^[1],人均占有粮食从 297.7 kg 增长到 444.0 kg,增幅达 49%,成功解决了我国民众的温饱问题。由此可见,化肥的使用确实对增产有显著的效果^[2],但增产背后是过度使用带来的一系列问题。经科学统计及计算,我国化肥的利用效率为

39.8%^[3],相较于欧美等发达国家 50% 左右的利用率,我国施用化肥的利用率显然偏低。过量施用的氮肥会被土壤中的硝化细菌和亚硝化细菌转变为硝酸盐,蔬菜和饲料作物在生长过程中不断吸收产生的硝酸盐,使之进入食物链,最终进入人体^[4]。而过量的化肥会随降水等下渗,导致地下水污染^[5]。长期过量施用化肥会对土壤造成严重的不良影响。有研究显示,长期单施化肥会造成土壤各粒级的水稳性团聚体及有机碳含量出现不同程度的降低^[6];长期施肥会导致植物根系分泌物含量发生变化,影响土壤微生物的生长环境,间接导致土壤动物的数量、种类发生变化^[7];适量的氮肥有助于根系微生物数量、种类的增长,而过量的氮肥会导致微生物的生长受到抑制,造成微生物数量与多样性显著下降^[8-9]。为保证农业和土壤的可持续发展,应逐步改善长期单施化肥的局面,积极推广应用有机肥料,并将二者合理配合施用。

2 有机肥的定义及分类

有机肥,俗称农家肥,是指将各种动、植物废弃物如粪便、秸秆、落叶等通过特殊工艺去除有害物质、达到无害化标准的一类肥料。生活中常见的有机肥多用畜禽粪便如牛粪等^[10],通过堆肥制成。常见的有机肥如农家肥料,主要利用家畜粪便进行堆积发酵制成。利用粪便制成的有机肥具有刺激性气味,但所含物质种类丰富,除了含有常见的氮、磷、钾元素外,还富含钙、镁、铁、锌、硼、锰等多种矿

收稿日期:2019-09-23

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD0800306);江苏省农业科技自主创新基金资金[编号:CX(17)1001-4]。

作者简介:张 奇(1993—),男,安徽安庆人,硕士,主要从事土壤改良与修复研究,E-mail:18752182205@163.com;共同第一作者:张振华(1962—),男,江苏太仓人,博士,研究员,主要从事土壤改良和修复研究,E-mail:zhenhuaz70@hotmail.com。

通信作者:卢 信,博士,副研究员,主要从事土壤改良与修复研究。
E-mail:lx deng@126.com。

质元素,可满足作物不同生长周期的需求。秸秆有机肥主要以小麦、玉米等的秸秆为原料;秸秆富含有机质、氮元素,经发酵制成的有机肥可作为化肥替代品,不仅对农业废物进行了二次利用,并且避免了秸秆燃烧造成的环境问题,同时带来了经济效益。三叶草是一种典型的绿肥,种植三叶草等植物可以有效保墒,生长期的根系可以进行生物固氮,成熟期又可翻压培肥土壤。沼气发酵肥主要利用各种果渣及果园修剪的枝条经堆腐发酵而成。生物有机肥是将微生物与有机肥结合,以动植物残余物为基质,进行无害化处理和分解后的一种肥料;微生物的加入大大丰富了有机肥的成分,提高了养分有效性;同时也使其在土壤改良方面更加具有针对性,例如土地酸碱改良,减少或降低土传病害的发生等。

3 生物有机肥的特点与优势

生物有机肥由有机肥衍生而来,它的优点和有机肥相同;首先它的原料来源广,从最原始的畜禽粪便^[11],到作物秸秆,再到现在的城市污泥、沼液沼渣、餐厨垃圾等,都已成为生物有机肥的原材料,不仅解决了生产问题,还消除了废弃物引起的环境污染等难题;其次生物有机肥养分成分多样,包括各类营养元素、小分子酸等,能满足植物生长的各种需求。与化肥相比,生物有机肥可以改善土壤理化性状,提高土壤肥力,对土壤无不良影响。此外,充足的养分能提高作物产量与品质,改善植物根系周围的微生物环境,从而提高植物的抗病性;与普通有机肥相比,生物有机肥的好氧发酵技术可以使物料的理化性质稳定无害,特有的除臭工艺在气味的处理上具有明显效果^[12],完全腐熟的过程能确保虫卵死亡率达 95%,可以有效避免土传病害的发生;与生物菌肥相比,生物有机肥价格更具有市场竞争力,同样成本条件下,生物有机肥能为土壤补充更多的有机质,促进土壤养分的释放。

4 生物有机肥对土壤理化性质的影响

土壤理化性质主要包括 pH 值、有机质含量、土壤容重、土壤孔隙度和土壤团聚结构。

4.1 生物有机肥对土壤容重及孔隙度的影响

土壤容重是评价土壤紧实度的常用方法。容重过大会导致土壤渗透性和透水性差,阻碍植物生根;过小则会引引起有机质分解速度过快,植物扎根不牢。胡诚等通过不同方式处理低产黄泥土,考察

土壤腐殖质组成及结合形态、土壤理化性质、双季稻产量的变化,结果显示,生物有机肥处理组的土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量和阳离子交换量均高于化肥处理组^[13]。张金妹等的研究同样显示,生物有机肥的施用可以降低土壤容重^[14-15]。土壤容重对土壤入渗能力有很大影响,土壤入渗能力与土壤储水量和容重呈负相关关系^[16]。由此可知,施用生物有机肥能明显提高土壤的蓄水能力。土壤孔隙度是孔隙体积与土壤体积的比值。合理的孔隙度有益于土壤储存水分,促进植物的生长。曲成闯等的研究显示,随着施肥量的提高,生物有机肥处理组的土壤总孔隙度有所提升,土壤中的各项水力学指标增大^[17]。

4.2 生物有机肥对土壤 pH 值及有机质含量的影响

作为土壤的重要物理指标,土壤 pH 值通过影响土壤肥力来影响植物生长^[18]。不适宜的 pH 值会抑制土壤养分的相互转化。研究表明,向盐碱地中施用生物有机肥可以有效降低土壤 pH 值^[19-20]。长期以来,盐碱地的 pH 值一直较高,导致植物减产。生物有机肥的施用可以降低土壤 pH 值。胡诚等在长期的生物有机肥研究中得出,随着有机肥投入量的增加,碱性土壤的酸碱度降低^[21]。由此可知,长期施用生物有机肥可以有效降低盐碱地的土壤 pH 值。土壤有机质泛指土壤中一切源于生命的物质,它是植物生长过程中营养物质的主要来源,其含量是衡量土壤肥力的常用指标^[22],与土壤养分的供应^[23-24]和物理性质的改善以及土壤侵蚀的预防有着重要的关系。因此,在一定范围内土壤有机质含量越高,土壤性质越好^[25]。生物有机肥是由生物残体经发酵处理后添加特定微生物产物制成的,因此,施肥后土壤有机质含量会有所增加。长期施用生物有机肥,不仅能提高土壤有机质含量,还能使有机质含量保持在相对稳定的水平^[26-27]。有研究显示,土壤 pH 值与有机质含量存在一定的关系^[28-29]。相关试验表明,一定程度上土壤 pH 值与有机质含量呈负相关关系^[30-31]。

4.3 生物有机肥对土壤养分的影响

氮、磷、钾是主要的土壤养分。而土壤大部分养分存在于不溶性矿物及有机质中,这些物质作用较晚,很难被作物吸收。可供本季作物吸收利用的有效养分仅占土壤质量的 0.005%~0.100%,它们存在于水溶液中,吸附在土壤胶体表面。在一定条

件下,这种缓效养分和速效养分能够相互转化。土壤速效养分含量是指土壤中水溶性养分含量与交换性养分含量的总和,常用于表征土壤养分供应强度。速效养分是植物营养元素的主要来源,直接影响着作物各个阶段的生长。孔涛等对比了牛粪有机肥与生物有机肥对土壤速效养分的供应情况,结果显示,施用生物有机肥处理组的速效养分含量显著增加^[32]。这是因为生物有机肥中含有大量的木霉菌,堆肥过程中会产生大量的低分子有机酸,使土壤中的氮、磷、钾被活化,速效养分含量提高。土壤理化性质直接影响作物对养分及水分的吸收。前述研究表明,有机肥能明显改善土壤理化性质,促进植物生长。

5 生物有机肥对土壤生物及生物活动的影响

5.1 生物有机肥对土壤动物的影响

土壤生物是指生存在土壤中活的有机体。研究中常将其分为土壤微生物和土壤动物两大类。土壤生物作为土壤环境的重要组成部分,它在土壤肥力的形成与演化、高等植物的营养供给等方面起着重要的作用。因此,它们种类、含量的变化对土壤有一定的影响。研究表明,土壤的基本理化性质与土壤动物的数量和种类密切相关,土壤动物通过调节土壤中细菌、真菌的类型来改变土壤养分循环^[33]。土壤生物类群数会随着土壤养分含量的增加而增长,随土壤 pH 值增大而下降^[34]。无脊椎动物在促进团粒结构的形成和稳定中起到了重要作用^[35]。阳文锐的研究显示,施用生物有机肥可以有效增加土壤中蚯蚓的数量^[36]。蚯蚓会通过吞噬土壤中富含有机物的土壤颗粒,分泌含有大量含碳氮养分的复合物及水分^[37-38],这些分泌物可为植物和微生物的生长提供营养。有研究显示,蚯蚓的吞噬作用能显著提高土壤有效养分的含量,进而提高土壤肥力^[39]。除取食、消化、排泄、分泌等过程外,蚯蚓还可以通过掘穴等非取食活动发挥其生态功能^[40],这对改善土壤微环境具有积极意义。除了对土壤矿化具有促进作用及可改良土壤结构外,土壤动物对凋落物的分解作用也会引起土壤中木质素、纤维素、半纤维素、氮、磷等有效成分浓度的变化^[41-42],从而丰富土壤养分。

5.2 生物有机肥对土壤微生物的影响

土壤微生物数量庞大,在土壤养分转化的过程中具有至关重要的作用。微生物与土壤矿物质的

相互作用,可以改变矿物质与微生物的活性,从而提高土壤环境活力^[43]。有研究显示,土壤细菌的数量与 pH 值呈显著正相关关系^[44]。细菌的最适生长 pH 值为 6 ~ 8^[45],生物有机肥能有效保证土壤 pH 值保持在这个范围中。土壤微生物量作为一项衡量土壤养分的指标,能有效反映土壤养分转化率,是分析土壤生物质量变化的指标^[46]。薛菁芳等的研究显示,微生物碳、氮量与土壤全碳、氮量呈极显著相关关系,可以作为评价土壤肥力的指标^[47]。田小明等的研究结果显示,在中、低肥力土壤中施用生物有机肥,可显著提高土壤微生物碳、氮含量^[48]。施用生物有机肥可以提高土壤中真菌与细菌生物量的比例。而真菌与细菌生物量的比值可以用来评价土壤生态系统的健康和稳定程度,比值越高说明土壤健康程度越高^[49]。作为土壤中最活跃的有机碳、氮素储备库,微生物碳、氮的转化速度是普通生物残体的 10 倍,它能在极短的时间内为土壤提供大量的碳、氮养分,满足动植物的生长所需。生物有机肥能有效地提高土壤微生物碳、氮含量,但不同耕作层的效果不同,其中对 0 ~ 15 cm 耕层土壤的提升效果最明显。

5.3 生物有机肥对土壤酶活性的影响

酶是环境中的有机体产生的一种代谢产物。作为一种蛋白质,酶能催化一系列的化学反应,推动土壤的代谢^[50]。土壤中常见的酶有脲酶、磷酸酶等。土壤脲酶能促进尿素向氨的转化,相关的研究表明,尿素酶活性与氨、总氮含量存在显著的正相关关系,土壤脲酶与土壤养分含量存在显著或极显著相关性^[51-52]。因此,可将土壤酶活性作为衡量土壤肥力水平的指标。研究表明,增施有机肥能提高土壤中脲酶的活性;土壤磷酸酶能促进土壤有机磷向无机磷的转化^[53],它能保障土壤内源无机磷的含量,磷酸酶活性提高能显著增加土壤有效磷的含量^[54]。有研究证明,生物有机肥处理组与其他肥料处理组相比能有效提高土壤磷酸酶的活性^[55]。总的来说,生物有机肥有助于提高土壤生物的丰富度。土壤生物作为土壤养分的分解转化者,通过吞噬咀嚼、分解动植物残体,使之不断降解;土壤生物运动时会翻动、搅拌土壤,可促进土壤团粒结构的形成,在稳定土壤肥力上具有积极作用。

6 生物有机肥对作物产量及品质的影响

植物生长分为营养生长和生殖生长。营养生

长是指植物的根茎叶等部分的生长;生殖生长是指植物发育到一定时期后开花、授粉、受精、结果形成种子的过程。生物有机肥对不同作物不同时期的生长都具有显著的促进作用。

6.1 生物有机肥对作物生长及产量的影响

王立刚等发现,施用生物有机肥可以促进作物的良好生长,提高植物光合作用效率^[56]。长期施用生物有机肥有助于作物产量的持续稳定提高。当生物有机肥施用量为 15 000 kg/hm² 时,小麦产量分别比常规、对照处理高 1 808.14、3 652.39 kg/hm²,夏玉米产量分别增加 2 668、5 062 kg/hm²。邓接楼等研究显示,生物有机肥更能促进小白菜的生长发育,小白菜的生长量分别比复合肥、尿素处理高 5.4%、18.4%,比未施肥的白菜高 34.0%,且差异极显著^[57]。周艳等研究显示,施用生物有机肥可大幅度提高水稻株高、有效穗数、实粒数、产量^[58]。此外,对番茄、黄瓜、甜瓜、鱼腥草等不同作物的研究均显示,生物有机肥能发挥良好的增产作用^[59-61]。生物有机肥增产、促生长的效果是多方面的:首先,它自身的叠加效应能长期为土壤提供各种营养元素;其次,生物有机肥富含有机质,植物可以直接吸收某些可溶性有机物中的氮、磷成分,一些特殊的微量元素为植物特定时期的生长提供了保证^[62],也为增产打下基础;生物有机肥在发酵过程中会产生一系列有益的生理活性物质如吲哚乙酸(IAA)、神经节苷脂(GA)、氨基酸、核酸、尿囊素等^[63],这些植物激素能有效促进根系生长、细胞分裂分化以及单性结实。

6.2 生物有机肥对作物品质的影响

贺兰山东麓是我国重要的酿酒葡萄产地,长期大面积种植葡萄导致当地土壤贫瘠,葡萄产量及品质均有所下降。郭洁等在此基础上开展了生物有机肥施用试验,结果表明,在一定范围内,生物有机肥施用量与葡萄叶绿素含量、果实干物质和糖含量呈显著正相关关系,并且能在一定程度上降低酸度,改善口感^[64]。韦忠等在烤烟种植研究中发现,施用生物有机肥可以提高烟叶中的钾含量,从而提高其抗病能力;同时,烟叶含糖量增加,香气明显改善^[65]。对生姜的研究显示,施用生物有机肥可以提高根茎干物质和挥发油等的含量,提高生姜品质,降低硝酸盐含量^[66]。李巨等的研究显示,施用生物有机肥可以显著提高果实硬度^[67]。在小白菜、花生等作物上施用生物有机肥均能在一定程度上改善作物产量及品质。果蔬类品质的提升主要包括外

观品质、口感 2 个方面。生物有机肥对果实外观品质的促进作用可能主要通过抑制病害来体现。崔仕春等的研究显示,施用生物有机肥能促进小麦根系活力,使小麦叶片中苯丙氨酸解氨酶(PAL)、多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)等防御酶活性也有所提高;另外,对生物有机肥浸出液的分析表明,生物有机肥对小麦全蚀病菌有拮抗作用;而有机肥中的某些芽孢杆菌及代谢物能强烈抑制小麦全蚀病菌菌丝生长^[68]。影响果蔬口感的因素有很多,除了昼夜温差带来的糖分累积外,还有研究显示,某些酶活性的提高也能增加果实的甜度^[69-70],而生物有机肥具有提高生物量酶活性、促进生物生长的特点,但目前并没有直接的试验结果证明生物有机肥对果蔬口感的改良是由肥料促进酶活性引起的。

7 生物有机肥应用中存在的问题

生物有机肥在一些国家得到了广泛的应用。在一些欧洲国家,生物肥的施用量占农业肥料总施用量的 45%~60%,美国的生物肥施用量更高达 60%~70%。由此可见,生物有机肥未来大有取代普通化肥成为主要农用肥料的可能。而在我国,生物有机肥的使用并不广泛。造成这一现象的原因有以下几个方面:首先,成本太高,生物有机肥的肥效大约为普通复合肥的 1/8,施用同等面积的土地化肥只需要几十千克,而生物有机肥则可能需要消耗几百千克。其次,有机肥肥效比化肥见效慢,对于土壤的改良作用需要数年的时间,这对于普通农民而言不现实。我国虽然在农业上的扶持力度很大,但对于生物有机肥的推广并没有配套的政策,仅仅依靠收入微薄的农民很难完成,因此在我国大规模推广生物有机肥的可能性不高。生物有机肥的优点很多,但如果仅施用生物有机肥,土壤肥力无法在短时间内迅速提高,所以在实际的应用中需要配施化肥来弥补生物有机肥肥效见效慢的缺点^[71]。再次,我国现阶段制造的生物有机肥功能单一,且肥效受环境因素影响较大,不同类型的土壤中存在的土著微生物不同,它们长期生存在较为稳定的环境中,土壤环境一旦发生改变可能会引起这些微生物死亡。因此将微生物添加到有机肥中再撒施到土壤中,可能会引起微生物的失活,使得在短期内无法体现出生物有机肥的优点。最后,生物有机肥的制造成本偏高。生物有机肥的制造技术在我国已经比较成熟,但面对目前如此庞大的市

场,却少有公司愿意制造生物有机肥,原因是制造与运输的成本偏高,不便销售。

8 小结和展望

生物有机肥作为一种绿色、多功效的土壤养分补充物,虽然目前难以普及,但随着化肥过量使用危害的日益加重,生物有机肥的大面积推广将是必然趋势。生物有机肥可以在保肥土壤的同时改善土壤性质,并对农业废弃物进行二次利用,有效解决生活废弃物不经处理造成的环境问题等。生物有机肥的优点很突出,但也存在明显的不足。首先就是肥效缓慢,其次虽然养分种类丰富,但氮、磷、钾等元素含量与同等质量的化肥相比明显不足。所以,生物有机肥与化肥配施时需要寻找到一个合适的比例。如此不仅可以有效地减少化肥的使用量,还可以降低生物有机肥的用量,削减成本。此外,生物有机肥的推广需要相关政策的支持,如对农民购买生物有机肥进行经济补贴,对制造肥料的工厂进行降税甚至前期进行免税扶持,以保证产业能持续发展。使用生物有机肥种植的作物品质比普通化肥更好。随着社会的发展,人们对食品质量的要求越来越高,因此,适当提高生物有机肥种植作物的价格,将有助于提高农民的生产积极性。生物有机肥的最大优势就是添加了有益微生物,但目前可添加的微生物种类有限,且对于某些肥料增产机制的研究还不够,例如,果蔬品质的提升与肥料施用之间的关系等。如果能找到一种能显著提高果实含糖量的微生物,将其加入到液体生物有机肥中后进行叶面施肥,或许能直接提升作物品质。

参考文献:

- [1]李辛一.长期化肥投入对我国粮食产量影响的实证[J].中国国际财经,2016(21):61-67.
- [2]晓军.农村改革40年[J].新农业,2018(22):6.
- [3]陈同斌,曾希柏,胡清秀.中国化肥利用率的区域分异[J].地理学报,2002,57(5):531-538.
- [4]谷端银,焦娟,高俊杰,等.设施土壤硝酸盐积累及其对作物影响的研究进展[J].中国蔬菜,2017(3):22-28.
- [5]管恩太,武强,安文静,等.化肥、农药对水污染初探[J].河南化工,2000(9):32-33.
- [6]鲁艳红.长期施肥条件下红壤性水稻土有机质特征及其与土壤质量的关系[D].长沙:湖南农业大学,2011.
- [7]朱新玉,朱波.不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):911-920.
- [8]Meidute S, Demoling F, Bååth E. Antagonistic and synergistic effects

- of fungal and bacterial growth in soil after adding different carbon and nitrogen sources[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2334-2343.
- [9]罗明,文启凯,陈全家,等.不同用量的氮磷化肥对棉田土壤微生物区系及活性的影响[J].土壤通报,2000,31(2):66-69, 96-97.
- [10]韩永胜,张淑芬.肉牛粪污肥料化处理与还田技术[J].黑龙江畜牧兽医,2016(9):66-67.
- [11]王建才,朱荣生,王怀中,等.畜禽粪便重金属污染现状及生物钝化研究进展[J].山东农业科学,2018,50(10):156-161.
- [12]于焕娣.生物有机肥的特点与合理施用[J].河北农业,2018(3):39-41.
- [13]胡诚,刘东海,陈云峰,等.不同土壤改良措施对低产黄泥田土壤性质及水稻产量的影响[J].中国土壤与料,2016(3):117-121.
- [14]张金妹,田世尧,李扇妹,等.生物有机肥对土壤理化、生物性状和香蕉生长的影响[J].中国农学通报,2012,28(25):265-271.
- [15]罗兴录,岑忠用,谢和霞,等.生物有机肥对土壤理化、生物性状和木薯生长的影响[J].西北农业学报,2008,17(1):167-173.
- [16]李卓.土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究——以黄土为例[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [17]曲成闯,陈效民,韩召强,等.生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):70-76.
- [18]赵军霞.土壤酸碱性对植物的生长[J].内蒙古农业科技,2003(6):33-42.
- [19]张金柱,郭春景,张兴,等.生物有机肥对中度盐碱土壤理化性质影响的研究[J].湖北农业科学,2008,47(12):1420-1422.
- [20]高亮,丁春明,王炳华,等.生物有机肥在盐碱地上的应用效果及其对玉米的影响[J].山西农业科学,2011,39(1):47-50.
- [21]胡诚,曹志平,罗艳蕊,等.长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(3):48-51.
- [22]刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [23]李新爱,肖和艾,吴金水,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J].应用生态学报,2006,17(10):1827-1831.
- [24]Haynes R J. Soil organic matter quality and the size and activity of the microbial biomass: their significance to the quality of agricultural soils[M]//Huang Q Y, Huang P M, Violante A. Soil mineral microbe-organic interactions. Berlin: Springer, 2008: 201-231.
- [25]韩晓增,王守宇,宋春雨,等.黑土有机质功效的研究[J].农业系统科学与综合研究,2001,17(4):256-259.
- [26]伍从成,姜海波,赵静文,等.连续5年施用生物有机肥对梨树根系形态及分布的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(3):473-480.
- [27]王立刚,李维炯,邱建军,等.生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J].土壤肥料,2004(5):12-16.
- [28]夏磊,王德权.潍坊烟区土壤pH与土壤养分关系研究[J].安徽农业科学,2016,44(7):172-175.
- [29]戴万宏,黄耀,武丽,等.中国地带性土壤有机质含量与酸

- 碱度的关系[J]. 土壤学报,2009,46(5):851-860.
- [30] Motavalli P P, Palm C A, Parton C A, et al. Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(12): 1589-1599.
- [31] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1111-1118.
- [32] 孔涛, 马瑜, 刘民, 等. 生物有机肥对土壤养分和土壤微生物的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 884-891.
- [33] 黄玉梅. 土壤动物群落多样性研究进展[J]. 西部林业科学, 2004, 33(3): 63-68.
- [34] 张俊霞, 刘贤谦. 太谷县枣园土壤动物与土壤养分的关系[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005(1): 8-11.
- [35] 孙权, 何振立, 纪立东. 侵蚀退化生态系统恢复的土壤质量指标[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(2): 15-20.
- [36] 阳文锐. 长期施用生物有机肥对土壤生物学特性的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [37] 张池, 周波, 吴家龙, 等. 蚯蚓在我国南方土壤修复中的应用[J]. 生物多样性, 2018, 26(10): 1091-1102.
- [38] 单军. 食土蚯蚓对土壤有机质和酚类有机污染物降解转化研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [39] 袁向华, 周艳玲, 宋清姿, 等. 蚯蚓吞食过程中土壤理化性质与放线菌多样性的变化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1199-1210.
- [40] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [41] Mark D H, Sina A, Catherine M P. Relative effects of macroinvertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition[J]. Pedobiologia, 2003, 47(2): 101-115.
- [42] Ulrich I. Changes in the fauna and its contribution to mass loss and nrelease during leaf litter decomposition in two deciduous forests[J]. Pedobiologia, 200, 44(2): 105-118.
- [43] Mager D M, Thomas A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts a review of their role in dryland soil processes[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(2): 91-97.
- [44] 陈莉莉, 王得祥, 于飞, 等. 松栎混交林土壤微生物数量与土壤酶活性及土壤养分关系的研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 77-84.
- [45] 周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [46] Ekenler M, Tabatabai M A. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidase in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 39: 51-61.
- [47] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 247-250.
- [48] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 481-488.
- [49] Black H I J, Parekh N R. Assessing soil biodiversity across Great Britain: national trends in the occurrence of heterotrophic bacteria and invertebrates in soil[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 67(3): 255-257.
- [50] 姬兴杰, 熊淑萍, 李春明, 等. 不同肥料类型对土壤酶活性与微生物数量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 123-133.
- [51] 李华, 陈英旭, 梁新强, 等. 土壤脲酶活性对稻田田面水氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 55-58.
- [52] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.
- [53] 刘艳霞, 李想, 蔡刘体, 等. 生物有机肥对烟株和土壤酶活性以及烟草超微结构的影响[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(6): 78-85.
- [54] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊2): 139-143.
- [55] 秦闯, 李硕, 郭艳杰, 等. 增施生物有机肥减施化肥对夏玉米土壤生物指标的影响[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(6): 17-23.
- [56] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004(5): 12-16.
- [57] 邓接楼, 王艾平, 涂晓虹. 生物有机肥对小白菜产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(17): 4359, 4363.
- [58] 周艳, 钟积东, 吴晓燕, 等. 生物有机肥对水稻产量及重金属含量的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(3): 39-41.
- [59] 刘全文. 生物有机肥对大棚番茄产量的影响[J]. 甘肃科技, 2016, 32(13): 147-148.
- [60] 巩子毓, 高旭, 黄炎, 等. 连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 777-783.
- [61] 马美兰, 戚正华. 生物有机肥对甜瓜产量及发病率的影响[J]. 上海农业科技, 2010(3): 101-102.
- [62] 王书转. 长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.
- [63] 李庆康, 张永春, 杨其飞, 等. 生物有机肥肥效机理及应用前景展望[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 84-86.
- [64] 郭洁, 孙权, 张晓娟, 等. 生物有机肥对酿酒葡萄生长、养分吸收及产量品质的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(12): 76-80, 84.
- [65] 韦忠, 尹永强, 钟启德, 等. 施用生物有机肥对烤烟生长及其产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 135-138.
- [66] 孔祥波, 徐坤, 尚庆文, 等. 生物有机肥对生姜生长及产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(2): 64-67.
- [67] 李巨, 李长喜. 生物有机肥对花生生长发育及产量的影响[J]. 花生学报, 2014, 43(3): 52-55.
- [68] 崔仕春, 杨秀芬, 郑兴耘, 等. 生物有机肥控制小麦全蚀病及作用机理初探[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(1): 112-118.
- [69] 胡丽松, 吴刚, 郝朝运, 等. 菠萝蜜果实中糖分积累特征及相关代谢酶活性分析[J]. 果树学报, 2017, 34(2): 224-230.
- [70] 王惠聪, 黄辉白, 黄旭明. 荔枝果实的糖积累与相关酶活性[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 1-5.
- [71] 胡茜, 赵远, 张玉虎, 等. 生物炭配施化肥对稻田土壤有效氮素以及水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 108-112.