

王 琪,张永波,贾亚敏,等. 有机肥和生物炭对重金属污染农田土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):263-267.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.049

有机肥和生物炭对重金属污染农田土壤肥力的影响

王 琪¹,张永波¹,贾亚敏¹,李爱民²,王建武²,杨永亮²,张利明²

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院,山西太原 030024; 2. 山西省地质调查院,山西太原 030006)

摘要:为了揭示有机肥和生物炭施入对重金属污染农田土壤肥力和修复植物生长的影响,采用田间定位试验的方法,以山西忻州金矿周边重金属污染土壤为研究对象,检测施用有机肥、生物炭之后,不同修复植物根际土壤的 pH 值、有机质含量、阳离子交换量及酶活性等的变化。结果表明,施用有机肥和生物炭后,重金属污染土壤中的有机质含量、阳离子交换量、全氮及全磷含量、脲酶和过氧化氢酶活性都有不同程度的提高,土壤 pH 值、全钾含量均有下降。与对照相比,施用生物炭之后,黑麦草根际土壤的阳离子交换量、全氮含量、过氧化氢酶活性分别提高了 12.40%、7.35%、16.21%,施用有机肥后,苜蓿根系的有机质含量显著增加了 73.81%。施用有机肥和生物炭可以提升重金属污染土壤的肥力,有助于修复植物的生物量积累和修复效果的提高。

关键词:有机肥;生物炭;重金属污染土壤;阳离子交换量;土壤酶;土壤肥力;植物修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0263-05

2014 年,由原环境保护部与国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,我国耕地土壤中的重金属含量超标面积达 7.6 万 km²,造成不同程度的农作物污染和经济损失,而矿区周边农田土壤的污染情况更加严峻^[1-3]。国内外学者针对土壤重金属污染的修复技术进行了大量研究,其中经济安全、环境友好的植物修复成为土壤污染修复研究

的新方向^[4]。但因修复植物大多植株矮、根系短、生物量小等,在田间试验中的修复效率较低,而通过强化措施确保土壤肥力以及修复植物的修复效果是现阶段农田重金属污染修复研究的热点^[5]。

有机肥中的有机质含量高、肥效持续时间长,富含氮(N)、磷(P)、钾(K)等大量元素和镁(Mg)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)等微量元素,在保肥增产方面有着化肥不可比拟的优势。生物质炭通常用树木、农业废弃物、动植物组织等生物质在无氧或者部分缺氧及相对低温(<700℃)的条件下裂解炭化形成炭材料,由 60% 以上的 C、N、H、O 以及碱性矿物质组成,其表面含有丰富的含氧官能团和多孔结构,具有很强的离子吸附性,常用作土壤

收稿日期:2018-11-14

基金项目:山西省应用基础研究项目(编号:201701D221223)。

作者简介:王 琪(1992—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事重金属污染土壤修复研究。E-mail:arieswang92@163.com。

通信作者:张永波,博士,教授,主要从事矿山地质及环保研究。E-mail:zfstzhang@sina.com。

undae at low temperature [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 94: 98-102.

[6] Zhu X J, Li W L, Zhan L, et al. The large-scale process of microbial carbonate precipitation for nickel remediation from an industrial soil [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 149-155.

[7] 成 亮, 钱春香, 王瑞兴, 等. 碳酸盐矿化菌株 A 固结土壤 Cd²⁺ 的生物矿化过程[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(增刊 1): 215-221.

[8] 许燕波, 钱春香, 陆兆文. 微生物矿化修复铅离子污染的研究[J]. 化工时刊, 2012, 26(6): 14-17.

[9] 李 哲, 张 欢, 张秀芳, 等. 一株碳酸盐矿化菌的分离鉴定及其对 Cu 的固定作用[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3687-3695.

[10] 李 哲, 陈潼樾, 冷 粟, 等. 一株氧化木糖无色杆菌对 Pb 的生物矿化作用及其应用效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2017,

36(10): 2014-2020.

[11] 王明明, 钱春香. 磷酸盐矿化菌矿化重金属离子 Zn²⁺ 的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(3): 393-395.

[12] 钱春香, 许燕波, 胡黎明, 等. 一种微生物固结污染体系中 Cu²⁺ 的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12H): 33-36.

[13] 赵 越, 姚 俊, 王天齐, 等. 碳酸盐矿化菌的筛选与其吸附和矿化 Cd²⁺ 的特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3800-3806.

[14] 刘凤芝, 马锦秋. 土壤监测分析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[15] Podda F, Zuddas P, Minacci A, et al. Heavy metal coprecipitation with hydrozincite [Zn₅(CO₃)₂(OH)₆] from mine waters caused by photosynthetic microorganisms [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(11): 5092-5098.

改良剂和固碳剂^[6-7]。有关有机肥、生物炭在改良土壤方面的研究表明,两者在改良土壤理化性质、提高土壤肥力和微生物活性、提高作物产量和改善作物品质等方面具有重要作用^[8]。有机肥可以调节土壤 pH 值、缓解土壤酸化程度,通过有机质的吸附作用和腐殖质的包裹能力,可以有效减少土壤养分的流失并提高营养元素的有效性^[9-13]。此外,有机肥丰富的酶促基质能促进微生物的生长繁殖,提高土壤酶活性,增加土壤细菌群落的多样性^[14-15]。生物炭可以显著提高土壤 pH 值、有机质含量、阳离子交换量和土壤养分含量,可实现对南方酸性土壤的改良,对玉米、油菜产量有提升作用^[7,16-17]。而对于重金属污染的土壤,长期施用有机肥可以增加其中有效态铜、锌、镉等重金属的含量,更有利于污染物质向修复植物体内的转移^[18]。但当前有关生物炭、有机肥对土壤肥力、作物生长影响的研究以南方酸性土壤的室内试验、盆栽试验居多,结论差异较大^[17]。开展有机肥和生物炭施入对大田土壤理化性质及作物产量影响的研究,对重金属污染农田土壤的修复具有重要意义。

本试验依托山西省地质调查院的“山西省土地质量地球化学评估试点及典型地区污染治理方法研究”项目,以山西省繁峙县金矿周边重金属污染农田土壤作为研究对象,对比分析施入有机鸡粪肥和生物炭对土壤基本理化性质及酶活性的影响,以期揭示降低重金属离子对生长植物的毒害作用机制,同时达到增加植物生物量、提高修复效果的目的,进而确定对特定修复植物作用效果较好的辅助处理方式,为矿区重金属污染生物修复提供有效的强化手段。

1 研究区概况及试验方法

1.1 研究区概况

研究地点位于山西省忻州市繁峙县某金矿严重污染农田,周围分布有金矿、钼矿和铁矿等。地理位置为 113°34'E,39°16'N,该地夏季温和,冬季寒冷干燥,属于明显的大陆性气候,年平均气温为 6.3℃,年平均降水量为 350~400 mm,一年四季受大气环流的影响变化较大,降水少、风沙大、蒸发快,风、雹、洪、霜等自然灾害时有发生。该区域农业发达,种植有玉米、马铃薯、高粱等粮食作物和胡麻、大麻等经济作物。当地农田多年来受到混汞法冶金及污水灌溉的影响,土壤中重金属含量超标普

遍。供试表层土壤(0~20 cm)的基础理化性质如下:pH 值为 8.23,阳离子交换量(CEC)为 107.9 mmol/kg,有机质质量分数为 1.26%,全氮含量为 813 mg/kg,全磷含量为 925 mg/kg,全钾质量分数为 2.21%。

1.2 试验设计

采用小区试验,设置 6 个 5 m×10 m 的小区,按照植物种类+处理方式的顺序依次设置为如下处理:MCK(苜蓿对照组)、MY(苜蓿有机肥)、MS(苜蓿生物炭)、HCK(黑麦草对照组)、HY(黑麦草有机肥)、HS(黑麦草生物炭)。将平整后的农田分区、起垄,在各小区内按折线形设置 5 个取样点,采集表层土样,用于基础数据的测定。播种前将有机肥(Y)和生物炭(S)分别按照 0.15、0.1 kg/m² 的用量一次性施入对应小区并翻入土壤,紫花苜蓿、北方黑麦草种子分别按 22.5、30.0 kg/hm² 的用量等间距均匀条播入土壤,于 2017 年 5 月 17 日施肥播种,于 2017 年 9 月 17 日收割,生长周期为 4 个月,其间定期浇水除草并不再施入任何肥料。植物成熟后,采集各小区表层土壤(0~20 cm)样品,用于测定土壤 pH 值、有机质含量、阳离子交换量等养分指标和脲酶、过氧化氢酶活性。

1.3 样品检测方法

所有土样自然风干后过 2 mm 筛,土壤 pH 值用离子选择性电极法(ISE)测定,用 25 mL 水浸泡 10 g 风干土样。土壤有机质含量用氧化还原容量法(VOL)测定,使用重铬酸钾-硫酸溶液、砂浴加热消毒。阳离子交换量用乙酸铵交换法测定,将风干土样经氯酸铵加热处理。土壤全氮含量用酸碱滴定容量法测定,全钾、全磷含量用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定。土壤脲酶与过氧化氢酶活性用酶联免疫吸附分析(ELISA)试剂盒测定,委托青岛科创质量检测有限公司进行测定。

1.4 数据分析方法

使用 Excel 2016 和 SPSS 15.0 进行数据整理和分析,用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 施用有机肥和生物炭对土壤 pH 值、CEC、有机质含量的影响

土壤 pH 值、阳离子交换量、有机质含量是衡量土质肥沃与否的重要指标,不仅关系着修复植物的生长状况,还会对土壤中污染重金属的形态产生直

接影响。pH 值的改变使土壤颗粒、矿物等成分表面的电荷状态随之变化,进而影响重金属状态、活性重金属含量。有机质直接影响土壤理化性质,还可通过物理吸附或者化学结合的方式,以自身含量的变化影响土质甚至重金属状态。

由表 1 可知,与基础数据相比,MCK、MY、MS 3 种处理都降低了土壤的 pH 值,其中 MY 处理的作用效果与 MCK 相比显著($P < 0.05$),使初始值降低了 0.17;MY、MS 处理的土壤阳离子交换量分别比初始值提高了 6.41%、6.02%,提高效果都显著优于 MCK 处理($P < 0.05$),但两者之间无明显差异;MCK 处理的有机质质量分数相对于初始值没有变化,MY、MS 处理的土壤有机质含量显著高于对照组($P < 0.05$),其中 MY 处理比 MCK 处理增加了 73.81%。

表 1 施用有机肥和生物炭对苜蓿根际土壤 pH 值、CEC、有机质含量的影响

处理	pH 值	CEC (mmol/kg)	有机质含量 (%)
MCK	8.20 ± 0.06a	109.50 ± 1.33b	1.26 ± 0.022c
MY	8.06 ± 0.08b	114.82 ± 1.01a	2.19 ± 0.016a
MS	8.12 ± 0.10ab	114.40 ± 0.97a	1.46 ± 0.025b

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

由表 2 可知,HY 处理使土壤的初始 pH 值显著降低了 0.19($P < 0.05$),作用效果优于 HS 处理;HY、HS 处理的土壤阳离子交换量和有机质含量都显著高于 MCK 处理($P < 0.05$),其中 CEC 分别比初始值提高了 7.93%、14.07%,HS 处理的有机质含量则比对照组增加了 54.31%;同时,HS 处理的 CEC、有机质含量显著高于 HY 处理。

施加有机肥和生物炭可以改善土壤理化性质,降低试验地土壤的 pH 值,提高 CEC 和有机质含量,改善的显著性略有差异。根据表 2 中的数据和上述分析可知,总体上看,有机肥对苜蓿根际土壤的改善效果好于黑麦草根际土壤,生物炭对黑麦草根际土壤的改善效果优于苜蓿根际土壤。

表 2 施用有机肥和生物炭对黑麦草根际土壤 pH 值、CEC、有机质含量的影响

处理	pH 值	CEC (mmol/kg)	有机质含量 (%)
HCK	8.29 ± 0.08a	109.50 ± 0.91c	1.16 ± 0.011c
HY	8.04 ± 0.11b	116.46 ± 1.24b	1.49 ± 0.035b
HS	8.17 ± 0.10ab	123.08 ± 1.17a	1.79 ± 0.013a

2.2 有机肥和生物炭施入对土壤中总 N、P、K 含量的影响

土壤中的氮、磷、钾含量是土壤肥力的衡量指标,其中全氮含量是基础肥力的重要指标,可以为合理施氮肥提供依据;全磷是土壤有效磷的基础,能够补给作物的磷素营养,是土壤的潜在肥力指标。

植物采收后土壤中的全氮、全磷含量都比初始值高。由图 1 可知,苜蓿根际土壤的氮含量在有机肥作用下显著提高($P < 0.05$),比对照组高 5.52%,相比于初始值增加了 15.25%;施加有机肥、生物炭都显著提高了黑麦草根际土壤的氮含量($P < 0.05$),HS 处理组的增加效果显著高于 HY 处理组($P < 0.05$),比对照组高 7.35%,相比初始值增加了 18.57%。由图 2 可知,无论是苜蓿根际土壤还是黑麦草根际土壤,其磷含量都在有机肥作用下的 MY、HY 处理明显升高,分别比对照组高 8.77%、9.34%,分别相对初始值增加了 22.05%、25.30%。由图 3 可知,经过 4 个月的生长期后,各处理组的土壤全钾含量都比初始值低,MS、HS 处理分别比对照组低 3.63%、3.65%,分别相对初始值降低了 15.84%、16.29%,但是各处理组之间并无明显差异。

由图 1、图 2、图 3 和以上分析可知,总体上看,

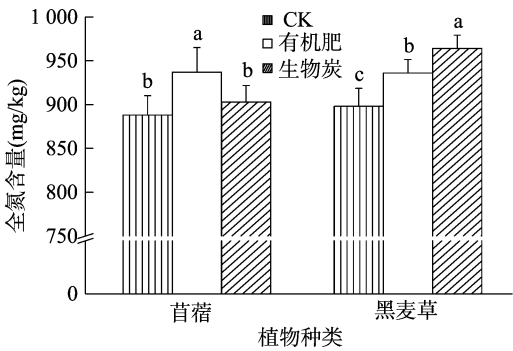


图 1 土壤全氮含量

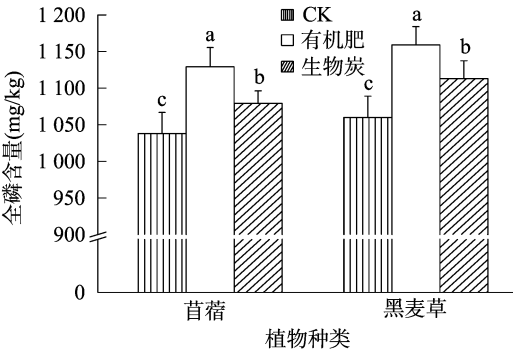
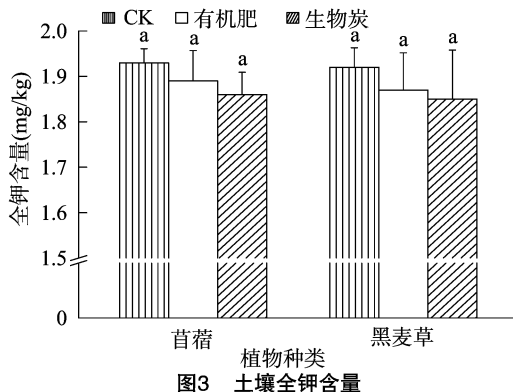


图 2 土壤全磷含量

苜蓿在有机肥作用下的生长状况优于生物炭处理,施加有机肥使苜蓿根际土壤的营养元素含量明显增加;生物炭对黑麦草根际土壤中营养元素的提高效果好于作用在苜蓿根际,但是黑麦草对有机肥、生物炭的强化作用在营养元素方面没有体现出很强的偏好性。



2.3 有机肥和生物炭施入对土壤脲酶、过氧化氢酶活性的影响

土壤酶活性能够反映土壤中各生物化学过程的强度和方向,与土壤理化性质、肥力状况和农业措施显著相关,是土壤肥力和土壤自净能力的重要评价指标之一。本试验选用脲酶、过氧化氢酶为考查指标,在植物成熟后挖取根际表层土(0~20 cm)制成土样进行检测。

无论是种植苜蓿还是黑麦草,土壤中脲酶、过氧化氢酶的活性变化趋势是相同的:相对于不作任何处理的对照组(CK),施用有机肥、生物炭都能使土壤中脲酶、过氧化氢酶的活性提高,只是提高程度不同。由图4可知,MY处理下的脲酶活性显著高于其他处理($P < 0.05$),HCK、HY、HS各处理之间的脲酶活性并无明显差异。由图5可知,相比于MCK、MY、HCK、HY、MS、HS处理下的过氧化氢酶活性显著较高($P < 0.05$),分别比对照组高5.34%、16.21%。以上结果表明,施入有机肥能有效提高苜蓿根际的脲酶活性,但是有机肥和生物炭对黑麦草根际脲酶活性的提高作用不明显;施入生物炭能有效提高苜蓿、黑麦草根际的过氧化氢酶活性。

3 讨论与结论

生物炭、有机肥能够调节土壤pH值,使其处于中性偏碱性状态,降低过高的pH值。在本试验中, HY处理的效果最好,使pH值降低了0.19。生物炭、有机肥都能提高土壤理化性质、酶活性等指标,

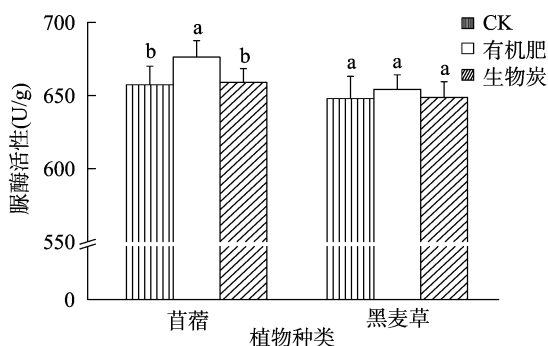


图4 土壤脲酶活性

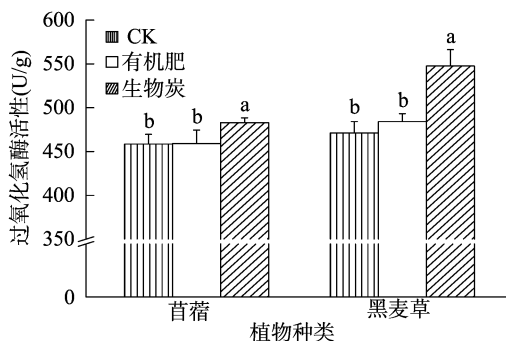


图5 土壤过氧化氢酶活性

其中处理效果最好的是HS、MY、HS、HY、MY、HS处理,分别使阳离子交换量、有机质含量、全氮含量、全磷含量、脲酶活性、过氧化氢酶活性相比对照组提高了12.40%、73.81%、7.35%、9.34%、2.89%、16.21%。本试验中有机肥、生物炭都降低了苜蓿和黑麦草根际土壤中甚高的钾含量,并且2组间差异不显著。

在土壤中施入有机肥、生物炭后,会对土壤理化性质、酶活性等指标产生影响,从而提升土壤肥力。在植物生长期结束后,有机肥和生物炭都降低了土壤的pH值,这一结果与多数学者提出的提高土壤pH值的结论不同,可能是由于研究区土壤呈碱性,因而不同于以往有机肥、生物炭对酸性土壤pH值的改良效果。张永春等的研究也发现,增施有机肥降低了土壤pH值,但土壤酸碱缓冲容量保持稳定甚至提升,这是因为有机肥分解过程中产生的腐殖酸通过酸基解离和氨基质子化提高了土壤的酸碱缓冲性^[11]。土壤有机质可以改良土壤结构、提高保水保肥能力、支持微生物活动等,是土壤肥力的重要指标;而阳离子交换量则代表了土壤可能保持的养分数量,即保肥性的高低。本试验中土壤的有机质含量、CEC在有机肥、生物炭作用下的变化趋势是相同的,MY、HS处理的作用效果要好于MS、

HY 处理的作用效果。一方面是因为腐熟的有机肥含有超过本身质量半数的有机质,生物炭也含有大量稳定的芳香化合物和部分不稳定的脂肪族化合物,对土壤有机质形成直接补充;另一方面,生物炭有利于土壤颗粒间形成团聚体并提高其稳定性,从而减少有机质淋失。土壤胶体表面的可变电荷受 pH 值影响极大,生物炭长时间留在土壤中会形成更多含氧官能团,从而增加其表面电荷量,进而提高 CEC^[16]。

在本试验中,有机肥、生物炭提高了土壤氮、磷含量,但降低了钾含量。有机肥中的有机质分解产生的有机酸会溶解土中的矿物,使其风化进而释放养分,同时速效养分被有机质吸附又能减少流失。其中有机磷可在有机肥的作用下转化为无机磷,并且通过腐殖质包裹 Fe、Al、Ca 等元素的氧化物从而降低其对磷的吸附,提高磷素的有效性^[13]。生物炭则是通过其多孔结构减缓养分流失来影响土壤营养元素的含量。由于研究区降水少、风沙大、蒸发快,使得土壤中原本的钾含量高于我国土壤肥力标准的最高级(甚高),而种植植物后各处理组反而降低了钾含量。

土壤酶是一类参与土壤生物化学反应的催化性特殊物质,脲酶可以促进尿素水解为氨,过氧化氢酶可促进过氧化氢分解,防止其对生物体的危害。有机肥对土壤酶活性的提高主要体现在 2 个方面:(1)有机肥本身含有各类营养元素、酶促基质,在增加土壤养料的同时直接提高酶活性;(2)有机肥提高了土壤有机质、腐殖质含量,为绝大多数吸附态酶提供了丰富的结合位点或络合位点,保护了酶的有效性^[14,19]。因此,能直接提供大量养分的有机肥对脲酶活性的提升明显。生物炭的强吸附性不仅可以缓释养分,还能吸附重金属离子等有害物质,防止对植物、微生物的毒害作用,因而对过氧化氢酶活性的提升显著。相比之下,MY、HY 处理需要消耗大量酶来消除重金属毒害,所以活性提升不如 MS、HS 处理明显。

有机肥、生物炭对土壤各类肥力指标影响的显著性与植物类型有关,总体呈现出生物炭对黑麦草根际微环境的调节效果较好、有机肥对苜蓿根际微环境的调节效果较好的趋势,但具体作用原因还有待进一步研究。

参考文献:

[1] Wu G, Kang H B, Zhang X Y, et al. A critical review on the bio -

- removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco - environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174 (1/2/3): 1 - 8.
- [2] 环境保护部与国土资源部国土资源部环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 国土资源通讯, 2014: 26 - 29.
- [3] 曲向荣. 土壤环境学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 223.
- [4] Schwitzguébel J P, Comino E, Plata N, et al. Is phytoremediation a sustainable and reliable approach to clean - up contaminated water and soil in alpine areas? [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2011, 18 (6): 842 - 856.
- [5] 邢艳帅, 乔冬梅, 桂桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (17): 208 - 214.
- [6] Goldberg E D. *Black carbon in the environment: properties and distribution* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 38 - 40.
- [7] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33 (20): 6534 - 6542.
- [8] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25 (1): 175 - 181.
- [9] 龚伟, 颜晓云, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦—玉米轮作土壤微生物群落组成和分形特征的影响[J]. *土壤学报*, 2011 (6): 1141 - 1148.
- [10] Singh A, Agrawal M, Marshall F M. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater - irrigated area [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (12): 1733 - 1740.
- [11] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 465 - 472.
- [12] 卢志红, 嵇素霞, 张美良, 等. 长期定位施肥对水稻土磷素形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (5): 1065 - 1071.
- [13] 杨丽娟, 李天来, 周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (5): 205 - 208.
- [14] 林瑞余, 林豪森, 张重义, 等. 不同施肥条件对鱼腥草根际土壤酶活性及根系活力的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23 (1): 280 - 284.
- [15] 叶俊, Perez P G, 王小丽, 等. 不同栽培环境下有机与常规蔬菜土壤的细菌群落多样性差异[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (4): 728 - 735.
- [16] 李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (11): 2233 - 2239.
- [17] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (8): 1292 - 1297.
- [18] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (1): 129 - 135.
- [19] Pascual J A, García C, Hernández T. Lasting microbiological and biochemical effects of the addition of municipal solid waste to an arid soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30 (1/2): 1 - 6.