

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.004

# 烟类生物质材料对土壤氮磷钾有效性的影响

马 鹏<sup>1</sup>, 陈 沛<sup>2</sup>, 李 冰<sup>2\*</sup>, 王昌全<sup>2</sup>, 陈玉蓝<sup>1</sup>, 王 勇<sup>1</sup>

(1.四川省烟草公司凉山州公司,四川 西昌 615000;2.四川农业大学资源学院,四川 成都 611130)

**摘要:**为废弃的烟杆、烟叶寻求资源化利用途径,为生物炭配合生物质农用提供科学依据,探究了烟杆生物炭配施烟叶生物质的混合材料对土壤氮磷钾养分有效性的影响。在室内恒温条件下开展培养试验,共设 4 个处理,包括不施生物质材料照(CK)、100%烟杆生物炭(T1)、70%烟杆生物炭+30%烟叶生物质(T2)、30%烟杆生物炭+70%烟叶生物质(T3)。结果表明:添加烟杆生物炭和烟叶生物质混合材料能够显著提高土壤铵态氮和硝态氮含量,T3 处理对土壤铵态氮提升幅度最大,增幅为 141.09%~161.21%;T2 处理对土壤硝态氮提升幅度最大,增幅为 207.52%~239.45%;培养期内,CK 处理土壤有效磷、缓效钾和速效钾含量均显著低于 T1,T2,T3 处理,T1 处理均显著高于 T2,T3 处理,培养结束后 T1 处理相较于对照土壤有效磷、缓效钾、速效钾增幅分别为 257.76%~283.67%,209.30%~216.67%,450.00%~472.00%。添加烟杆生物炭和烟叶生物质混合材料可显著提高土壤有效氮磷钾素含量,不同配比效果不同,需根据生产实际选择适宜配比。

**关键词:**生物炭;生物质材料;土壤养分

**中图分类号:**S572;S153 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)03-0017-05

## Effects of Tobacco Biomass on Soil NPK Availability

MA Peng<sup>1</sup>, CHEN Pei<sup>2</sup>, LI Bing<sup>2\*</sup>, WANG Changquan<sup>2</sup>, CHEN Yulan<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

(1. Liangshan Branch of Sichuan Tobacco Company, Xichang, Sichuan 615000, China;

2. School of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** To find ways for resource utilization of abandoned tobacco stem and leaf, and to provide scientific basis for agricultural use of biochar and biomass, this paper explored the effects of tobacco stem biochar combined with tobacco biomass on soil nitrogen, phosphorus and potassium nutrient availability. The culture experiment was carried out under constant temperature in the laboratory. Four treatments were set up, including no application of biomass material (CK), 100% tobacco stem biochar (T1), 70% tobacco stem biochar + 30% tobacco leaf biomass (T2), 30% biochar + 70% tobacco leaf biomass (T3). The results showed that: adding tobacco stem biochar and tobacco biomass mixed materials could significantly improve the content of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, T3 treatment had the largest increase of soil ammonium nitrogen, T2 treatment had the largest increase of soil nitrate nitrogen, and the increase rates were 141.09%~161.21%, 207.52%~239.45% respectively; during the cultivation period, the content of soil available phosphorus, slow available potassium and available potassium in CK treatment were significantly higher than that in CK treatment compared with T1, T2 and T3 treatments, T1 treatment was significantly higher than T2 and T3 treatment. After the end of culture, the increase of available P, slowly available K and rapidly available K in T1 treatment was 257.76%~283.67%, 209.30%~216.67% and 450.00%~472.00% respectively. Adding tobacco stem biochar and tobacco biomass mixture can significantly improve the content of soil available nitrogen, phosphorus and potassium. Different treatments have different effects, so the appropriate ratio should be selected according to the actual production.

**Keywords:** biochar; biomass material; soil nutrient

收稿日期:2021-01-18

基金项目:中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC201803, SCYC202004);四川省烟草公司凉山州公司科技项目(LSYC201801)。

作者简介:马鹏(1987—),男(回族),四川西昌人,助理农艺师,学士,研究方向:烟叶生产管理。\*通信作者:李冰(1976—),男,四川通江人,教授,博士,研究方向:土壤肥力与施肥。

## 0 引言

土壤养分的含量及其有效性对作物生长发育有着重要的影响,适宜的土壤环境可以调控养分的释放与转化,有利于提高土壤有效态养分的含量<sup>[1]</sup>。生物炭以其固有的理化特性和结构特征,能直接或间接改变土壤环境,对土壤养分的有效性具有改良作用<sup>[2-4]</sup>。在苏打盐碱土中施用玉米秸秆生物炭能显著降低土壤 pH 值,提高土壤速效氮磷钾浓度<sup>[5]</sup>;施用烟秆生物炭,可增强土壤微生物的活性,提高土壤中速效钾含量,改善烟叶品质<sup>[6]</sup>;将生物炭与氮肥配合施用,可显著减少氮肥的淋失,提高土壤肥力,促进作物生长<sup>[7-8]</sup>。植物物料中含有大量的中、微量元素,将其施入土壤,可提高土壤养分含量,促进作物生长<sup>[9-11]</sup>。近年来,生物炭配合生物质还田的研究不断拓展<sup>[12-13]</sup>。添加玉米秸秆碎屑和生物炭的复合材料,能够吸附添加到土壤中的营养物质,提高氮、磷营养物质的利用效率<sup>[14]</sup>;秸秆及生物炭配施可降低砖红壤酸度,提高营养元素交换性能<sup>[15]</sup>。

烟草是一种重要经济作物,我国烟草种植面积大、产量高,每年有大量的烟叶、烟末等下脚料被废弃,这不但会造成资源浪费,甚至会导致环境污染和烟草病虫害的传播<sup>[16]</sup>。如何处理这些废弃物并加以利用是烟草行业的一大难点。本试验将烟秆生物炭和烟叶生物质物料按比例复配后,通过室内培养试验,研究不同配比烟类生物质材料对土壤氮、磷、钾有效态养分的影响,以期为我国大量的废弃烟秆、烟叶提供绿色、环保的资源化处理措施,促进烤烟可持续发展,同时为生物炭配合生物质的农用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自四川省凉山州会东县新云乡,土壤类型为紫色土,其基本性质为:pH 6.65、有机质质量分数 23.26 g/kg、铵态氮质量分数 8.62 mg/kg、硝态氮质量分数 26.61 mg/kg、有效磷质量分数 17.95 mg/kg、速效钾质量分数 127.30 mg/kg、缓效钾质量分数 693.73 mg/kg。供试烟类生物质原料采自四川省凉山烟区,烟秆生物炭为烟秆在 600 °C 高温下热解 1 h 制得,pH 10.16,全氮、全磷、全钾质量分数分别为 11.4、1.3、18.8 g/kg;烟叶生物质为烟叶在马弗炉温度降至 300 °C 时利用余温杀菌 15 min 制得,pH 7.22,全氮质量分数 13.6 g/kg、全磷质量分数 0.762

g/kg,全钾质量分数 4.98 g/kg。将制得的烟秆生物炭和烟叶生物质研磨后过孔径 150 mm 筛,得到的生物质粉末装于棕色瓶中备用。

### 1.2 培养试验

试验共设 4 个处理,分别为:不添加烟类生物质材料(CK)、100%烟秆生物炭(T1)、70%烟秆生物炭+30%烟叶生物质(T2)、30%烟秆生物炭+70%烟叶生物质(T3),其中烟类生物质材料添加量为土壤质量分数的 2%,每个处理 3 个平行共 12 盆。

培养方法:称取相当于 500 g 干土的鲜土,按照试验处理加入各配比试验材料 10 g 并与土壤充分混合,将水分调节至田间持水量的 70%,并在室内(25 °C)的条件下恒温培养 90 d。于培养 1,7,15,30,60,90 d 分次取样测定,各处理分别取 3 个重复的土样,风干、研磨过筛后待测。

### 1.3 测定指标、方法及数据分析

土壤铵态氮采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法;土壤硝态氮采用镀铜镉还原-重氮化偶合比色法;土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度法测定;缓效钾硝酸煮沸法测定。测定结果均换算成单位质量干土质量分数(mg/kg),具体测定方法参考鲁如坤《土壤农业化学分析方法》<sup>[9]</sup>。

数据处理、绘制图表采用 Microsoft Excel 2010,统计分析采用软件 SPSS17.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟类生物质材料对土壤速效性氮的影响

不同比例烟类生物质材料对土壤铵态氮含量的影响测定结果如表 1 所示。在培养期间,土壤铵态氮含量变化趋势基本一致:在 15 d 内先下降后上升,15 d 后呈缓慢下降趋势。3 个处理均能显著提高土壤铵态氮含量,且在培养的各个时期土壤铵态氮含量均显著高于对照;随着烟类生物质材料中生物炭比例的减少,对铵态氮的提升幅度越大,总体效果为 T3>T2>T1,且 T3 处理除 15 d 外均显著高于其余处理。90 d 后 T1,T2,T3 处理土壤铵态氮含量相比于对照增幅范围分别是 113.11%~125.20%,113.46%~136.96%,141.09%~161.21%。

表 2 显示,添加烟类生物质材料的 3 个处理在培养期内土壤硝态氮呈相似的变化趋势:在 7 d 前小幅度下降,而后呈逐渐上升趋势。CK 处理硝态氮含量在前期上升,30 d 达到峰值后下降。不同处理之间比较,7 d 前各个处理硝态氮差异无统计学意义( $P>0.05$ ),30 d 后添加烟类生物质的 3 个处理

表 1 烟类生物质材料对土壤铵态氮的影响

mg/kg

| 处理 | 时间/d        |             |             |             |            |            |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
|    | 1           | 7           | 15          | 30          | 60         | 90         |
| CK | 9.37±0.39d  | 8.09±0.17d  | 8.30±0.16c  | 7.03±0.12d  | 6.74±0.08d | 5.94±0.23c |
| T1 | 12.39±0.42c | 8.83±0.22c  | 9.69±0.19b  | 8.59±0.13c  | 7.83±0.31c | 7.11±0.12b |
| T2 | 14.37±0.28b | 10.25±0.45b | 11.62±0.30a | 9.34±0.31b  | 8.72±0.19b | 7.56±0.47b |
| T3 | 17.47±0.41a | 10.96±0.31a | 12.41±0.14a | 11.03±0.33a | 9.70±0.47a | 9.07±0.30a |

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

表 2 烟类生物质材料对土壤硝态氮的影响

mg/kg

| 处理 | 时间/d        |             |              |             |             |             |
|----|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|    | 1           | 7           | 15           | 30          | 60          | 90          |
| CK | 31.59±1.73a | 32.88±1.37a | 38.81±1.95ab | 51.92±1.56b | 45.06±1.99c | 41.98±2.06c |
| T1 | 33.21±2.20a | 31.49±1.09a | 34.12±1.59c  | 42.49±1.49c | 56.65±1.81b | 70.59±3.64b |
| T2 | 33.29±1.17a | 32.83±2.76a | 41.62±1.73a  | 55.85±2.45a | 75.36±3.51a | 91.90±2.59a |
| T3 | 33.20±1.60a | 30.55±2.74a | 37.44±1.19b  | 38.62±0.90d | 57.68±3.76b | 66.74±1.30b |

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

硝态氮质量分数均显著高于对照,T2 处理显著高于 T1,T3 处理,且 T2,T3 差异无统计学意义( $P>0.05$ )。培养结束后 T1,T2,T3 处理土壤硝态氮质量分数相对对照分别增加 155.56%~188.39%,207.52%~239.45%,150.41%~156.36%。

### 2.2 烟类生物质材料对土壤有效磷的影响

表 3 显示,在整个培养期内,各处理土壤有效磷质量分数变化趋势基本一致:在 1~15 d 内呈上升

趋势,15 d 达到峰值而后逐渐下降。3 个处理均能显著提高土壤有效磷质量分数,在培养期内其有效磷质量分数均显著高于对照;不同处理之间差异有统计学意义( $P<0.05$ ),各处理有效磷质量分数随着烟类生物质材料中生物炭比例的增大而增加,为 T1>T2>T3。90 d 后 T1,T2,T3 处理有效磷相对对照增幅范围分别是 257.76%~283.67%,195.94%~222.16%,165.00%~182.21%。

表 3 烟类生物质材料对土壤中有效磷的影响

mg/kg

| 处理 | 时间/d        |             |             |             |             |             |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    | 1           | 7           | 15          | 30          | 60          | 90          |
| CK | 16.34±0.08d | 18.62±0.14d | 24.90±0.21d | 14.89±0.08d | 12.72±0.12d | 8.33±0.05d  |
| T1 | 27.86±0.22a | 29.78±0.02a | 37.65±0.12a | 26.07±0.17a | 25.01±0.12a | 22.44±0.10a |
| T2 | 23.07±0.14b | 25.11±0.19b | 33.72±0.30b | 23.42±0.10b | 20.77±0.06b | 17.34±0.12b |
| T3 | 21.57±0.02c | 23.75±0.13c | 29.77±0.14c | 19.43±0.14c | 17.20±0.13c | 14.42±0.07c |

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.3 烟类生物质材料对土壤缓/速效钾的影响

添加烟类生物质材料的 3 个处理土壤缓效钾质量分数变化趋势基本一致。在 1~15 d 内呈下降趋势,15~30 d 内上升 30 d 后缓慢下降;CK 处理缓效钾质量分数在 15 d 前上升,15 d 后缓慢下降;在整个培育期内,3 个处理土壤缓效钾质量分数始终显著高于对照,T1 处理显著高于 T2,T3 处理,90 d 时 T2 处理显著高于 T3 处理,其余时间二者差异无统计学意义( $P>0.05$ ) (表 4)。培养结束后 T1,T2,T3 处理缓效钾相对对照增幅范围分别是 209.30%~216.67%,130.23%~135.71%,125.58%~133.80%。

不同比例烟类生物质材料对土壤速效钾质量分数的影响测定结果如表 5 所示。在培养期内,各处理土壤速效钾质量分数变化趋势基本一致:在 1~7 d 内快速下降,随后呈缓慢下降趋势。CK 处理速效钾质量分数变化趋势与缓效钾相似,在 15 d 前上升,15 d 后缓慢下降。3 个处理均能显著提高土壤速效钾质量分数,培养期内其速效钾质量分数始终显著高于对照,且提升幅度 T1 处理显著大于 T2,T3 处理,T3 处理大于 T2 处理但差异无统计学意义( $P>0.05$ )。培养结束后 T1,T2,T3 处理速效钾相对对照增幅范围分别是 450.00%~472.00%,200.00%~212.00%,200.00%~216.00%。

表 4 烟类生物质材料对土壤缓效钾的影响

mg/kg

| 处理 | 时间/d           |                |                |                |                |               |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
|    | 1 d            | 7 d            | 15 d           | 30 d           | 60 d           | 90 d          |
| CK | 616.14±13.69c  | 638.96±20.91c  | 680.04±15.81c  | 634.40±7.91c   | 616.14±23.72c  | 579.63±7.91d  |
| T1 | 1364.64±41.83a | 1282.48±34.46a | 1273.36±13.69a | 1287.05±36.23a | 1268.79±34.46a | 1240.41±7.20a |
| T2 | 880.85±28.50b  | 853.47±7.91b   | 803.26±20.91b  | 844.34±28.50b  | 839.78±20.91b  | 771.32±7.91b  |
| T3 | 885.42±15.81b  | 848.90±27.38b  | 785.01±20.91b  | 821.52±13.69b  | 807.83±23.72b  | 753.06±13.69c |

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

表 5 烟类生物质材料对土壤速效钾的影响

mg/kg

| 处理 | 时间/d         |              |              |              |              |               |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|    | 1            | 7            | 15           | 30           | 60           | 90            |
| CK | 113.83±3.67c | 128.52±3.67c | 129.74±5.61c | 122.40±5.61d | 105.26±2.12c | 93.02±2.12c   |
| T1 | 637.70±7.64a | 492.05±7.34a | 488.38±3.67a | 483.48±5.61a | 445.20±7.50a | 430.85±2.12.a |
| T2 | 274.18±7.64b | 231.34±6.36b | 227.66±7.34b | 222.77±2.12b | 206.86±5.61b | 192.17±2.12b  |
| T3 | 281.52±5.61b | 235.01±7.34b | 232.56±7.64b | 228.89±5.61b | 209.30±3.67b | 194.62±3.67b  |

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

生物炭对土壤有效氮含量的影响较为复杂,一方面生物炭能吸附土壤溶液中的铵态氮和硝态氮,减少淋溶损失<sup>[17]</sup>,同时新鲜生物炭中的活性碳源能够促进土壤中有机态氮的矿化,释放出铵态氮和硝态氮,提高土壤氮含量<sup>[18]</sup>;另一方面,施用生物炭可能会提高土壤 C/N 比,导致微生物固氮作用加强,造成土壤有效氮含量降低<sup>[19]</sup>;此外,植物物料施入土壤不但可以直接提高土壤矿质元素含量,还可以在微生物的作用下分解转化,逐步释放出植物所需的营养物质<sup>[20]</sup>。本实验中,添加烟类生物质材料的 3 个处理土壤铵态氮和硝态氮质量分数相较于对照均显著提高,且土壤铵态氮质量分数随着混合材料中烟杆生物炭比例的增加而减少。一方面在生物炭制备过程中,高温条件引起有机质成分中氮素损失<sup>[21]</sup>,本研究中使用的生物炭为 600 °C 下热解,在热解过程中损失了大量的氮,同时,也因生物炭疏松多孔的表面性质可吸附大量的氮素<sup>[22]</sup>;此外,烟叶物质可在微生物作用下分解形成氨,氨经质子化作用生成铵态氮。添加烟类生物质材料的处理土壤硝态氮含量在 7 d 微弱下降,而后逐渐上升,T2 处理对土壤硝态氮的提升效果为最优,这可能是生物炭的吸附作用、有机质分解转化以及铵态氮向硝态氮的转化<sup>[23]</sup>共同作用的结果。

烟类生物质材料可以减缓土壤有效磷降低的速率,各处理相较于 CK 均有显著差异,材料中生物

炭比例越大效果越好。生物炭可以通过提高土壤 pH 值和阳离子交换量提高土壤磷素的有效性,高的 pH 值和 CEC 的生物炭加入土壤时,可减少铁和铝的交换量而增加磷的活性<sup>[24]</sup>,同时吸附土壤磷素减少其淋失;烟叶生物质可在微生物的分解转化下释放出磷素,从而增加土壤磷质量分数。在培养过程中,土壤有效磷质量分数  $T1>T2>T3$ ,且两两处理之间差异有统计学意义( $P<0.05$ ),表明同生物质相比,生物炭在土壤有效磷质量分数提升方面发挥了更大的效能。众多研究表明,生物炭可提高土壤水溶性钾、速效钾、交换性钾离子含量<sup>[25-26]</sup>,本研究结论与此一致。生物炭本身皆携带一定量钾素,施入土壤可提高土壤钾素质量分数,且表面吸附点位以及微孔可以对钾素产生强烈的吸附作用,减少土壤钾素淋溶与固定。

### 4 结论

将烟杆生物炭和烟叶生物质复配后的混合材料可以提升土壤氮、磷、钾养分的有效性,改善土壤肥力水平,从而促进废弃烟杆、烟叶资源化利用和烤烟的可持续发展。不同配比的烟类生物质材料对不同形态的土壤氮磷钾养分的影响效果不同,铵态氮随烟类生物质材料中生物炭比例减少而增加;70%烟杆生物炭+30%烟叶生物质对硝态氮的提升效果最好;有效磷质量分数随着烟类生物质材料中生物炭的增加而增加;单施烟杆生物炭对土壤钾素的提升效果最好。

## 参考文献:

- [1] 刘元生,刘方,陈祖拥,等.生物质炭对旱作土壤生物性状及养分有效性的调控效应[J].水土保持学报,2019,33(3):166-171+178.
- [2] SHRESTHA G, TRAINA S J, SWANSTON C W. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review [J]. Sustainability, 2010, 2(1): 294-320.
- [3] 杨兰,李冰,王昌全,等.改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J].环境科学,2016,37(9):3562-3574.
- [4] QUILIAN R S, GLANVILLE H C, WADE S C, et al. Life in the "Charosphere"—Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 287-293.
- [5] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137428 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137428>.
- [6] 王成己,陈庆荣,陈曦,等.烟秆生物质炭对烟草根际土壤养分及细菌群落的影响[J].中国烟草科学,2017,38(1):42-47.
- [7] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils [J]. Geoderma, 2019, 336: 1-11.
- [8] 李江舟,姜翼来,张立猛,等.不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):1075-1080.
- [9] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等.不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J].中国农业科学,2013,46(17):3594-3603.
- [10] 王增丽.秸秆不同处理还田方式对土壤理化特性和作物生长效应的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [11] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等.不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J].中国农业科学,2013,46(17):3594-3603.
- [12] 王艳杰,李法云,荣湘民,等.生物质材料与营养物配施对石油污染土壤的修复[J].农业环境科学学报,2018,37(2):232-238.
- [13] 吴敏,韦家少,孙海东,等.植物物料及其生物炭对酸性土壤的改良[J].热带作物学报,2016,37(12):2276-2282.
- [14] 杨兴,黄化刚,王玲,等.炭化烟草秸秆还田对连作植烟土壤及烤烟生长发育的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(2):245-255.
- [15] 索龙,潘凤娥,胡俊鹏,等.秸秆及生物炭对砖红壤酸度及交换性能的影响[J].土壤,2015,47(6):1157-1162.
- [16] 谭慧,彭五星,向必坤,等.炭化烟草秸秆还田对连作植烟土壤及烤烟生长发育的影响[J].土壤,2018,50(4):726-731.
- [17] LEHMANN J, DA SILVA J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferral-sol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343-357.
- [18] 赵殿峰,徐静,罗璇,等.生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J].西北农业学报,2014,23(3):85-92.
- [19] 陈山,龙世平,崔新卫,等.施用稻壳生物炭对土壤养分及烤烟生长的影响[J].作物研究,2016,30(2):142-148.
- [20] 吴敏,韦家少,孙海东,等.植物物料及其生物炭对酸性土壤的改良[J].热带作物学报,2016,37(12):2276-2282.
- [21] HE L, ZHONG Z, YANG H. Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(3): 704-712.
- [22] LAIRD D, FLEMING P, WANG B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158: 436-442.
- [23] 油伦成,李东坡,武志杰,等.稳定性铵态氮肥在黑土和褐土中的氮素转化特征[J].应用生态学报,2019,30(4):1079-1087.
- [24] DELUCA T H, GUNDALE M J, MACKENZIE M D, et al. Biochar effects on soil nutrient transformations [M] // LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation, 2nd edn. Earthscan, London. 2015: 421-454.
- [25] 王忠江,张正,刘卓,等.生物炭配施沼液对淋溶状态下土壤养分的影响[J].农业机械学报,2018,49(11):260-267.
- [26] 王亚琼.生物炭对土壤团聚体和钾素的影响[D].咸阳:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.