

草浆造纸木质素对土壤性质和小白菜生长的影响

刘继培¹, 汪 洪¹, 李书田¹, 李文彪^{1,2}, 刘荣乐^{3*}

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部植物营养与养分循环重点开放实验室,北京 100081; 2.内蒙古土壤肥料工作站,呼和浩特 010011; 3.中国农业科学院研究生院,北京 100081)

摘 要:草浆造纸废液是影响秸秆造纸发展的重要因素,利用小白菜盆栽试验研究了施用麦秸造纸废液木质素和麦秸对土壤性质及小白菜生长的影响,以期对造纸废弃物的资源化利用提供依据。结果表明,两茬小白菜收获后,铵木素配施 N 肥使土壤 pH 值降低;小白菜两茬连作后铵木素配施的土壤活性有机碳含量及多酚氧化酶活性分别为 $2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$,显著高于其他处理;除对照和单施氮肥外,两茬盆栽收获后土壤多酚氧化酶活性均高于第一茬试验。两茬小白菜收获后秸秆配施和碱木质素配施氮肥土壤过氧化物酶活性均高于其他处理。铵木素配施及秸秆配施的小白菜干重相近,显著高于碱木质素配施。研究表明,与秸秆还田相比,施用铵木素没有对土壤性状和小白菜生长产生不利影响,故铵法草浆木质素可以作为一种潜在的土壤有机改良剂应用。

关键词:木质素;秸秆;硝态氮;活性有机碳;酶活性

中图分类号:X793 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2018-06

Soil Properties and Cabbage Growth as Influenced by Application of Lignins Derived from Straw Pulping

LIU Ji-pei¹, WANG Hong¹, LI Shu-tian¹, LI Wen-biao^{1,2}, LIU Rong-le^{3*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Inner Mongolia Soil and Fertilizer Station, Mongolia 010011, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: The effluent waste is an important limiting factor to straw pulping and paper-making industry. A pot experiment was conducted with continued two harvests of Chinese cabbage to study the effects of application of wheat straw and lignin waste composites derived from wheat straw pulping on soil properties and cabbage growth. The results showed that a declined soil pH and significantly higher soil liable organic carbon content ($2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and polyphenol oxidase activity ($1.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$) were found with applying ammonium lignosulfonate plus N fertilizer. Compared with the measurements after the first harvest, soil polyphenol oxidase activity was found to be higher after the second harvest when wheat straw or straw lignin applied. The application of wheat straw plus N or kraft lignin plus N fertilizer had a higher soil peroxidase activities compared with ammonium lignosulfonate plus N or no organic materials used. Similar dry biomass weights of cabbage were obtained with applying ammonium lignosulfonate plus N and wheat straw plus N, which were significantly higher than with Kraft lignin plus N. It was suggested that soil and cabbage plant was not negatively affected by application of ammonium lignosulfonate derived by straw pulping comparing with wheat straw plow down and the lignin from ammonium sulfate straw pulping process could be used as one of potential organic soil amendments.

Keywords: lignin; straw; nitrate; liable organic carbon; enzymatic activity

近年来,可用于造纸的森林资源匮乏,特别是在中国,这促使人们将目光转移到非木质纤维造纸,而作物秸秆与木质纤维结构相近,所以被看作是天然的造纸资源^[1]。作物秸秆资源丰富,我国秸秆年产出量超

过 7 亿 t,为造纸工业提供了丰富的造纸资源。越来越多的国家已经开始广泛利用秸秆造纸^[2],然而,造纸制浆过程中产生含有大量木质素的废渣废液,这些废渣废液的直接排放对水体环境造成严重污染,Hatakeyama^[2]估计全世界每年造纸过程中生产的木质素副产品超过 3 000 万 t。随着现代科学技术的发展,造纸废液经浓缩、制浆蒸煮和脱水、加工造粒,结合养分配伍过程研制出木质素肥料,对麦秸草浆造纸废液进

收稿日期:2011-02-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)课题(2008AA06Z307)

作者简介:刘继培(1981—),女,河北沧州人,在读博士研究生,研究方向为固体废弃物资源化利用。E-mail:jpliu0516@126.com

* 通讯作者:刘荣乐 E-mail:rl Liu@caas.net.cn

行了资源化利用。

造纸制浆过程中产生的废渣废液含有大量木质素,木质素是由苯丙烷结构单元通过醚键和碳-碳键联结而成的天然的芳香族高聚物^[9],由于它的芳香结构以及分子内键的刚度和非均质性,木质素一直被认为能够促进土壤中的碳库稳定^[4-7]。国内外研究表明,木质素在土壤微生物作用下经过腐殖化过程形成的腐殖质对土壤理化性状产生一定的影响^[8-12],其在农业土壤改良方面的作用受到越来越广泛的关注^[13]。但是,对于秸秆还田和两种不同工艺造纸废液农用效用比较的研究较少。本实验研究了秸秆还田和两种木质素肥料施用对土壤化学性状及作物生物量的影响,从而为造纸废液资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2009年9月至2010年1月在中国农业科学院日光温室内进行。供试作物为小白菜,供试土壤为河北潮土,其基本性质为:有机质 12.30 g·kg⁻¹,全 N 0.95 g·kg⁻¹,全 P 9.97 g·kg⁻¹,全 K 20.05 g·kg⁻¹,硝态氮 49.22 mg·kg⁻¹,pH(水:土=2.5:1) 7.37。

供试化学肥料为尿素(含氮量 46.20%),磷酸二氢钾(P₂O₅:55.80%;K₂O:34.50%)和硫酸钾(K₂O:54.00%)。有机肥料为小麦秸秆(以 WS 表示)及山东某肥料公司生产的铵法木质素(以 ALS 表示,液态,有效成分含量为 35%)和碱法木质素(以 KL 表示,固态)。将小麦秸秆和碱法木质素粉碎,待用。供试物料基本理化性质见表 1。

铵法木质素(ALS)是通过在 130~140 °C 加热蒸煮秸秆,此时木质素被磺化成水溶性的木质素磺酸盐,纤维素则析出,将纤维素滤去,剩下的即是亚硫酸铵制浆废液,其肥效成分含量很高^[14],经浓缩、喷雾得到铵木质素,铵木质素的分子量达数万,具有良好的水溶性,其分子结构包括疏水性的芳香基和亲水性的磺酸基,具有一定的表面活性;碱法木质素(KL)是用烧碱液高温蒸煮制浆,经过制浆过程木质素大分子大

表 1 秸秆和木质素基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the straw and the two types of lignin

名称	全氮/%	有机质/%	腐植酸/%	pH 值
秸秆	0.59	46.50	—	7.30
铵法木质素	3.03	58.80	11.24	6.01
碱法木质素	0.72	41.90	33.90	9.46

部分已经降解,从造纸废液中分离出的木质素实际上是大分子降解形成的小碎片和各种碎片缩合物的混合物,碱木质素的分子量较低,水溶性差。

1.2 试验设计

1.2.1 试验处理

有机物料和 N、P、K 肥一次性施入。试验中秸秆用量为土重的 0.75%,盆栽前测定秸秆和木质素的有机物质总量,碱法木质素、铵法木质素用量与秸秆等碳量施入,所有处理均施用磷钾肥,其用量为 P₂O₅ 0.08 g·kg⁻¹ 土;K₂O 0.10 g,设置 5 个处理,重复 4 次。具体试验处理设置如表 2 所示。

1.2.2 种植周期及样品采集

盆栽试验于 2009 年 8 月至 11 月于中国农业科学院温室进行,种植作物为小白菜,第一茬和第二茬的种植周期均为 60 d,第二茬小白菜不施肥,利用第一茬后效。试验用盆高 40 cm,直径 40 cm。

准确称取 5 kg 风干土,与相应肥料混匀后装入塑料盆中,种植小白菜,出苗后每盆留苗 5 株,小白菜生长期间用质量差值法校准调节土壤水分至田间持水量的 65%~70%。经 60 d 取样,鲜样置于-80 °C 冰柜保存待测,风干土样过筛保存。植株样 105 °C 烘箱杀青 30 min 后,于 75 °C 烘干后磨碎过 60 目筛保存。

1.3 测定项目与方法

室内分析于农业部作物营养与施肥重点开放实验室中进行。样品土壤 pH(水土比 2.5:1)用 pH 计测定,土壤 EC 采用电导率仪直接测定;土壤硝态氮用 KCl 浸提,紫外分光光度法测定^[15];土壤全氮采用硫酸消煮-凯式定氮法测定;植株样全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,半自动凯式定氮法测定。土壤活性有机碳采用

表 2 盆栽试验设置

Table 2 Treatments designed in the pot experiment

处理	肥料及有机物料用量/g·kg ⁻¹ 土			
	氮肥	秸秆	铵法木质素	碱法木质素
CK	—	—	—	—
N	0.20	—	—	—
N+WS	0.20	7.50	—	—
N+ALS	0.20	—	5.90	—
N+KL	0.20	—	—	8.32

注:CK 为空白处理;N 为单施氮肥处理;N+WS 为氮肥与秸秆配施处理;N+ALS 为氮肥与铵法木质素配施处理;N+KL 为氮肥与碱法木质素配施处理。下同。

Note:CK refers to control, N refers to N fertilizer, N+WS refers to combination of N fertilizer and wheat straw, and N+ALS refers to combination of N fertilizer and ammonium lignosulfonate, N+KL refers to combination of N fertilizer and kraft lignin. The same below.

333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液氧化后比色测定^[16]。土壤中过氧化物酶和多酚氧化酶活性测定根据松荫测定方法进行测定^[17]。

1.4 数据统计

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2003、SPSS 13.0 和 SAS V8 统计软件进行统计分析。

2 结果分析

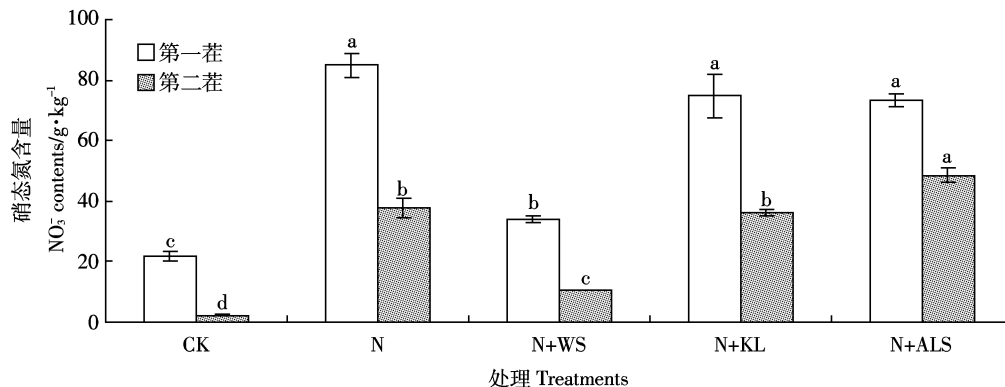
2.1 施用木质素对土壤硝态氮含量的影响

施用秸秆和木质素后土壤中硝态氮含量变化如图 1 所示,分别对第一茬和第二茬小白菜进行显著性检验。在第一茬小白菜收获以后,单施氮肥及氮肥分别与铵法木质素和碱法木质素配施的土壤中硝态氮含量显著高于其他处理($P<0.01$),其土壤中硝态氮含量分别为 84.85、73.34、74.85 mg·kg⁻¹, 秸秆与氮肥配施的土壤中硝态氮含量显著低于铵法木质素和碱法木质素分别与氮肥配施,土壤中硝态氮含量为 34.08 mg·kg⁻¹,仅高于对照。

两茬小白菜收获以后,铵法木质素与氮肥配施处理的土壤中硝态氮含量显著高于其他处理($P<0.01$),硝态氮含量为 48.67 mg·kg⁻¹,碱法木质素和氮肥配施与单施氮肥的土壤中硝态氮含量差异不显著,其含量分别为 37.70、36.30 mg·kg⁻¹。而秸秆与氮肥配施的土壤中硝态氮含量仅高于对照,其土壤中硝酸盐含量为 10.65 mg·kg⁻¹,由于氮素影响限制了小白菜的生长。

2.2 施用木质素对土壤 pH 值的影响

盆栽试验土壤中 pH 值的变化如图 2 所示,分别对第一茬和第二茬小白菜进行显著性检验。由于碱法木质素自身性质的影响,在第一茬小白菜收获时碱法木质素配施处理的土壤 pH 值显著高于其他处理,pH 值达 8.50,比空白处理的土壤 pH 值升高近一个单位,增幅为 12.87%。其他处理的 pH 值分别为 7.59、7.74、7.76,增幅分别为 0.70%、2.82%、3.04%。在第二茬小白菜收获时,对照、单施化肥、氮肥与秸秆配施的土壤 pH 值都有不同程度的升高,相对于第一茬小白菜收获后,土壤 pH 值分别增加 3.84%、2.10%、0.47%,



不同字母表示同一采样期处理间差异达到 1% 显著水平,下同。

Different letters at the same column indicate significant difference between groups mean values at the 0.01 test level, Similarly hereinafter.

图 1 施用木质素对土壤中硝态氮含量的影响

Figure 1 Effects of applying lignin on the contents of soil nitrate

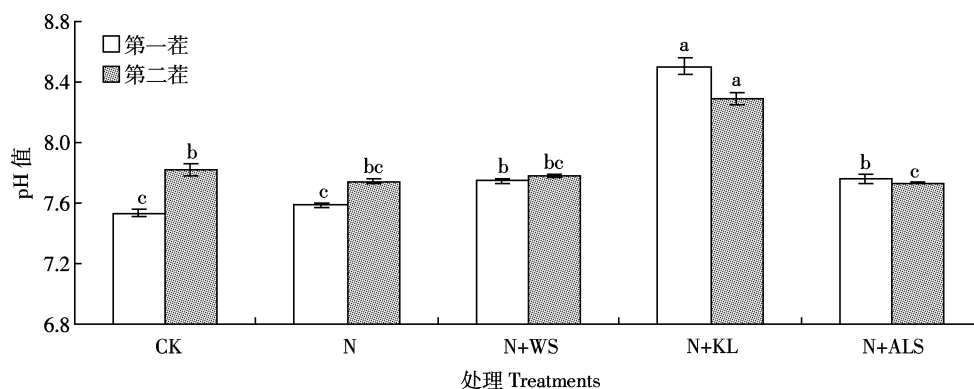


图 2 施用木质素对土壤 pH 的影响

Figure 2 Effects of applying lignin on the soil pH value

而在 N+KL 和 N+ALS 处理的土壤 pH 值都有不同程度的降低,相对于第一茬小白菜收获后,土壤 pH 值分别降低 2.49% 和 0.36%, N+ALS 的土壤 pH 值为 7.73, 低于对照。

施用 3 种有机物料均使土壤 pH 值上升,其中施用碱法木质素会使土壤 pH 值升高近一个单位,使土壤环境变差,对作物生长产生负面影响,但是在红壤上可能会改善土壤 pH 值,有待进一步研究;而秸秆配施的土壤 pH 值变化不大;在第二茬小白菜收获后,铵法木质素配施的土壤 pH 值显著低于对照($P < 0.01$),改善了土壤 pH 值,有利于作物生长。

2.3 施用木质素对土壤活性有机碳含量的影响

土壤活性有机碳是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化、易矿化,并对植物和土壤微生物活性影响较高的那部分有机碳^[18],是土壤微生物活性能量和土壤养分的驱动力^[19-20],是评价土壤碳库平衡的重要指标^[21]。

施用秸秆和木质素对土壤活性有机碳含量变化的影响如图 3 所示,分别对第一茬和第二茬小白菜进行显著性检验。在第一茬小白菜收获后,铵法木质素配施的土壤中活性有机碳含量显著高于其他处理,含量为 $2.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.01$),其次为碱法木质素与氮肥配施,土壤中活性有机碳含量为 $1.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其他 3 个处理间的土壤中活性有机碳含量差异不显著。

两茬小白菜收获以后,碱法木质素和铵法木质素分别与氮肥配施处理的土壤中活性有机碳含量显著高于其他处理($P < 0.01$),含量分别为 2.44 、 $2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与第一茬小白菜收获后土壤中活性有机碳含量相比,分别增加了 30.34% 和 19.73%,其他处理的土壤中活性有机碳含量均有不同程度下降,这说明在收获两茬小白菜以后,木质素与化肥配施显著提高了土

壤中活性有机碳含量。

本研究中种植两茬小白菜均以铵法木质素与氮肥配施的土壤中活性有机碳含量最高,这与有机无机肥配施的研究结果相似,长期定位试验表明^[22-23],长期施用有机肥能显著提高土壤中活性有机碳的含量。

2.4 施用木质素对土壤酶活性的影响

在土壤生态系统中,土壤酶对有机质分解和养分循环有重要作用^[24],土壤酶活性常用作生物活性和土壤肥力的指标^[25],其活性变化能够影响作物对养分吸收的有效性,同时过氧化物酶和多酚氧化酶为土壤中主要的木质素降解酶。

施用木质素对土壤中酶活性影响如表 3 所示。在第一茬小白菜收获以后,秸秆配施的土壤中过氧化物酶活性显著高于其他处理($P < 0.01$),各处理土壤中过氧化物酶活性分别比空白处理增加了 7.67%、48.97%、30.42%、39.52%;在第二茬小白菜收获以后,各处理土壤中过氧化物酶活性都有不同程度的增加,相对于第一茬小白菜收获后,土壤中过氧化物酶活性分别增加了 16.20%、15.82%、3.14%、23.39%、4.99%。其中碱法木质素配施处理的土壤中过氧化物

表 3 施用木质素对土壤中酶活性的影响

Table 3 Effects of applying lignin on soil enzymatic activities

处理	过氧化物酶 POD/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$		多酚氧化酶 PPO/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$	
	第一茬	第二茬	第一茬	第二茬
CK	$5.09 \pm 0.01\text{e}$	$5.91 \pm 0.08\text{c}$	$1.57 \pm 0.09\text{d}$	$1.55 \pm 0.06\text{c}$
N	$5.48 \pm 0.17\text{d}$	$6.35 \pm 0.06\text{c}$	$1.68 \pm 0.03\text{c}$	$1.61 \pm 0.10\text{c}$
N+WS	$7.58 \pm 0.05\text{a}$	$7.82 \pm 0.11\text{ab}$	$1.71 \pm 0.00\text{bc}$	$1.83 \pm 0.10\text{c}$
N+KL	$6.64 \pm 0.17\text{c}$	$8.19 \pm 0.14\text{a}$	$1.75 \pm 0.03\text{ab}$	$2.25 \pm 0.09\text{b}$
N+ALS	$7.10 \pm 0.10\text{b}$	$7.45 \pm 0.07\text{b}$	$1.77 \pm 0.02\text{a}$	$2.65 \pm 0.12\text{a}$

注:不同字母表示同一采样期处理间差异达到 1% 显著水平。

Note: Different letters at the same sampling date mean significant at 1% level.

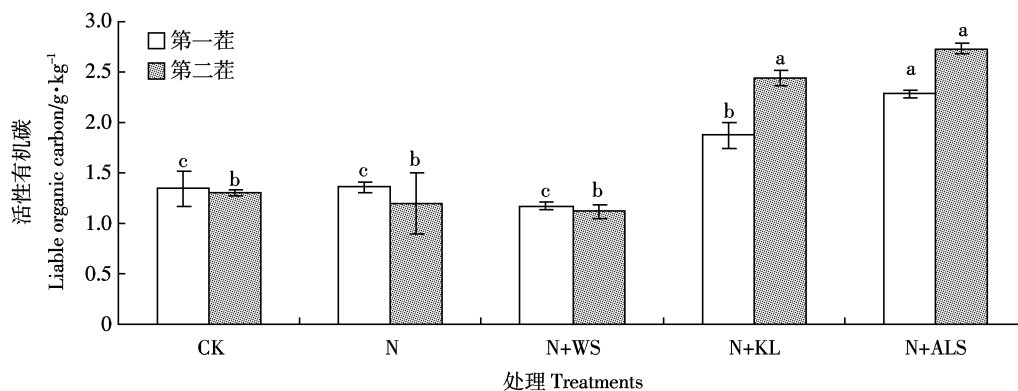


图 3 施用木质素对土壤中活性有机碳含量的影响

Figure 3 Effects of applying lignin on soil liable organic carbon content

酶活性最高,其值为 $8.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$,显著高于其他处理($P < 0.01$)。

第一茬小白菜收获后土壤中多酚氧化酶活性以铵法木质素配施最高,其土壤中多酚氧化酶活性为 $1.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$,与碱法木质素配施的土壤中多酚氧化酶活性差异不显著,但是显著高于其他处理($P < 0.01$);秸秆配施的土壤中多酚氧化酶活性与单施化肥处理差异不显著。第二茬小白菜收获后的土壤中多酚氧化酶活性以铵法木质素配施最高,其土壤中多酚氧化酶活性为 $2.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$,显著高于其他处理,单施化肥、秸秆配施的土壤中多酚氧化酶活性和对照差异不显著。除了对照和单施氮肥,土壤中多酚氧化酶活性在第二茬收获后相对于第一茬均有所增加,增加幅度分别为 7.02%、28.57%、49.72%,说明木质素与化肥配施能极大地提高土壤中多酚氧化酶活性。

综上所述,施用有机物料的土壤中过氧化物酶活性和多酚氧化酶活性均有不同程度的升高,两茬小白菜收获后,施用有机物料的土壤中过氧化物酶活性均显著高于单施氮肥;两茬小白菜收获后,铵法木质素配施的土壤中多酚氧化酶活性显著高于其他处理,这一结果可能是由于铵法木质素自身理化性质的影响,一些机理方面的问题尚待进一步研究。

2.5 施用木质素对土壤中腐植酸含量的影响

施用木质素对土壤中腐植酸含量的影响如图 4 所示。第一茬小白菜收获以后,秸秆配施和碱法木质素配施的土壤中腐植酸含量差异不显著,其土壤中腐植酸含量分别为 0.31%、0.32%,显著高于其他处理($P < 0.01$),单施氮肥和铵法木质素配施的土壤中腐植酸含量差异不显著。第二茬小白菜收获后,土壤中腐植酸含量均有不同程度的上升,其中碱法木质素配施的土壤中腐植酸含量显著高于其他处理,其土壤中腐植酸含量为 0.40%,这可能与碱法木质素本身性质有

关,其他施肥处理的土壤中腐植酸含量差异不显著。

2.6 施用秸秆和木质素对小白菜干重的影响

如图 4 所示,施用秸秆和木质素后,单施氮肥、秸秆与氮肥配施、铵法木质素与氮肥配施的第一茬小白菜干重相近,并无显著差异,小白菜干重分别为 4.14、4.20 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 4.40 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,但是显著高于碱化木质素与氮肥配施处理及对照($P < 0.01$)。第二茬小白菜干重以铵法木质素配施最高,干重为 2.94 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,显著高于其他处理($P < 0.01$)(图 5)。如前所述,氮素的影响限制了第二茬小白菜的生长,第二茬小白菜干重较第一茬相比均有所下降。整个实验过程来看,铵法木质素配施、秸秆配施和单施化肥两茬总干重均显著高于 N+KL 配施和对照($P < 0.01$),其中以 N+ALS 配施的干重最高,其两茬小白菜总干重为 6.95 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。

3 结论

第一茬小白菜收获后铵法木质素与氮肥配施的土壤中活性有机碳含量最高,其次为碱法木质素与氮肥配施;第二茬小白菜收获以后结果相似,施用木质素后土壤中活性有机碳增加,优于秸秆配施。

第一茬小白菜收获以后秸秆和氮肥配施的土壤

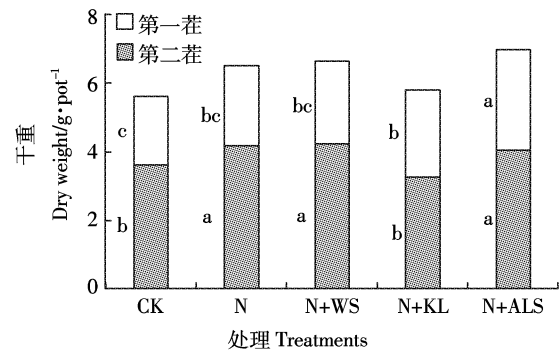


图 5 施用木质素对小白菜干重的影响

Figure 5 Effects of applying lignin on cabbage dry weight

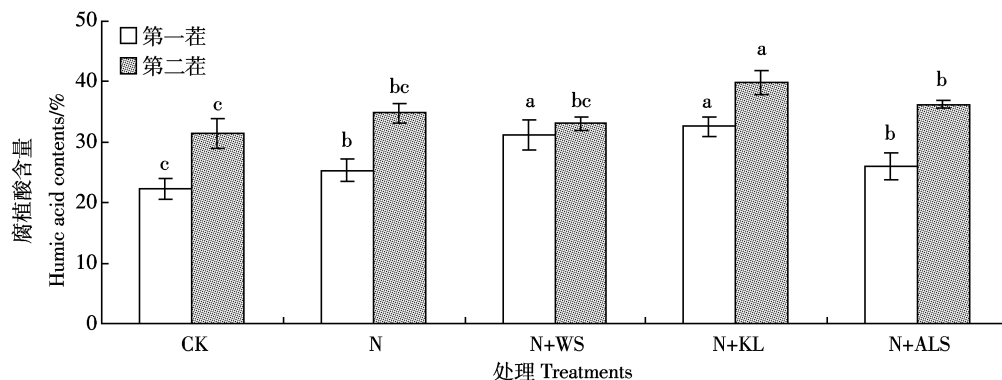


图 4 施用木质素对土壤中腐植酸含量的影响

Figure 4 Effects of applying lignin on soil humic acid

中过氧化物酶活性显著高于其他处理,第二茬小白菜收获以后,各处理的土壤中过氧化物酶活性都有不同程度的增加,碱法木质素配施的土壤中过氧化物酶活性最高。两茬小白菜收获后土壤中多酚氧化酶活性均以铵法木质素与氮肥配施最高。施用木质素和秸秆均能增加土壤中酶活性,但是增加程度及时期不同,具体酶活性增加机理有待进一步研究。

综合本盆栽试验研究结果表明,木质素作为工业造纸废液的副产品,经过一定的物理化学加工过程后进行农用具有一定的实用价值,通过不同处理比较得出,铵法木质素与氮肥配施能够显著提高土壤中活性有机碳含量、多酚氧化酶含量及作物的干物质量,其效果好于碱法木质素配施,所以通过亚硫酸铵草浆造纸获得的木质素可以作为一种潜在的土壤有机改良剂进行施用。

参考文献:

- [1] Xiao B, Sun X F, Sun R C. Chemical, structural and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw and rice straw[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2001, 74: 307-319.
- [2] Hatakeyama H, Hatakeyama T. Lignin structure, properties and applications[J]. *Advances in Polymer Science*, 2010, 232: 1-63.
- [3] 王德汉, 朱兆华, 彭俊杰, 等. 含氮木质素作为尿素控释材料提高水稻、玉米氮肥利用率研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 574-577.
- WANG De-han, ZHU Zhao-hua, PENG Jun-jie, et al. N-lignin used as a controlled-release material of urea in improving nitrogen-utilized efficiency for rice and maize crops[J]. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2003, 22: 574-577.
- [4] Waksman S A. Humus: Origin, chemical composition, and importance in nature[J]. *Soil Science*, 1939, 47: 255.
- [5] Ludwig H, Wolfgang Z. Black carbon-possible source of highly aromatic components of soil humic acids[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 23(3): 191-196.
- [6] Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72: 169-183.
- [7] Stevenson F. Humus Chemistry J. Genesis, Composition, Reactions[M]. 1994.
- [8] Kannan K, Oblisami G. Effect of pulp and paper mill effluent irrigation on carbon dioxide evolution in soils [J]. *J Agron Crop Sci*, 1990a, 164: 116-119.
- [9] Kannan K, Oblisami G. Influence of paper mill effluent irrigation on soil enzyme activities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990b, 22: 923-926.
- [10] Xiao C. Black liquor from crop straw pulping as a potassium source and soil amendment[D]. Washington: Washington State University, 2005.
- [11] Xiao C, Fauci M, Bezdicke D F, et al. Soil microbial responses to potassium-based black liquor[J]. *Soil Science*, 2006, 70: 72-77.
- [12] Xiao C, Bolto N R, Pan W L. Lignin from rice straw Kraft pulping: Effects on soil aggregation and chemical properties[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1482-1488.
- [13] 刘秋娟, 张学恭. 利用稻草碱木素生产肥料的研究[J]. *中国造纸*, 2002, 21(4): 29-32.
- LIU Qiu-juan, ZHANG Xue-gong. Utilization of alkali lignin of rice straw as fertilizer[J]. *China Pulp & Paper*, 2002, 21: 29-32.
- [14] 杨学富. 制浆造纸工业废水处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- YANG Xue-fu. Pulp and paper industrial effluent disposal [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2001.
- [15] 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.
- LU Ru-kun. The analytical methods for soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Technology Press, 2000.
- [16] Lefroy R D B, et al. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant Soil*, 1993, 155/156: 399-402.
- [17] 关松荫. 土壤酶学研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzymes and its methodology[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [18] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性碳的表征及其生态意义[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. The token and ecosystem meanings of soil activate carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38.
- [19] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fractions[J]. *American Journal of Soil Science Society*, 1994, 58: 1130-1139.
- [20] Coleman D C, Reid C P, Cole C. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 1-55.
- [21] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 167-172.
- [22] 张付申. 长期施肥条件下 Lou 土和黄绵土有机质氧化稳定性研究[J]. *土壤肥料*, 1996, 6: 32-36.
- ZHANG Fu-shen. Soil organic matter oxidation stability on Lou soil and yellow loamy soil under long-term fertilization[J]. *China Soils Fertilizer*, 1996, 6: 32-36.
- [23] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏[J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 34-41.
- MA Cheng-ze, ZHOU Qin, HE Fang. Profits and losses of soil organic carbon with the application of different fertilizer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 34-41.
- [24] Allison V, Condron L, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1770-1781.
- [25] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I: 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 9-13.
- FAN Jun, HAO Ming-de. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess Plateau I: Effect of crop rotation and continuous planting on soil enzyme activities[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2003, 9: 9-13.