



杨英,包兴幸,赵彦琦,等.猪粪水热处理产物对土壤性质及小白菜生长的影响[J].黑龙江农业科学,2025(1):76-85.

# 猪粪水热处理产物对土壤性质及小白菜生长的影响

杨英,包兴幸,赵彦琦,翟梓萌

(河南理工大学 资源环境学院,河南 焦作 454003)

**摘要:**为探讨猪粪废弃物资源化利用途径,将不同温度处理下的水热产物作为添加剂,对土壤进行培养研究其特性变化,通过小白菜种植试验验证不同温度处理下猪粪水热产物对土壤的改良效果。结果表明,与CK相比,土壤培养49 d时,各猪粪水热产物处理均显著降低了pH,且碱解氮、有效磷、速效钾、有机质及EC显著提升,其中ZF180处理组提升最为明显,碱解氮、有效磷、速效钾、有机质及EC分别提高了29.10%、61.78%、22.94%、20.31%和25.70%。种植60 d时,小白菜产量、生物量、株高、单株叶面积、根长都有所提高,其中ZF180处理组小白菜的生长性状表现最好,与CK对照组相比,分别增加了225.17%、225.39%、61.50%、104.78%和90.67%。因此,180℃水热处理温度是猪粪废弃物水热处理资源化利用的最适温度。

**关键词:**猪粪废弃物;水热产物;温度;土壤性质;小白菜

据统计,目前我国畜禽养殖行业每年能够产生的粪污达到了 $3.8 \times 10^9$  t。这些粪污大多没有被合理利用,综合利用率大概在50%~60%之间<sup>[1-2]</sup>。目前,畜禽粪便有相当一部分的处理方式是直接排入环境中,给大气、水体、土壤都造成了严重的污染<sup>[3-5]</sup>。猪粪是畜禽粪便的主要组成部分,其处理和资源化利用是实现农业可持续发展的关键。研究表明,健康猪只粪便中微量元素主要包括氮元素、磷元素、钾元素;重金属主要包括钙、铁、锌、镉等,是一种潜在的有机肥料资源<sup>[6]</sup>。近年来,国内外学者利用水热技术处理猪粪,但是相关的研究还较少。水热技术是指反应物在高温高压下,以水为反应介质,利用水在高温高压下的特殊性质,使有机固体废弃物发生一系列降解反应并获得可利用产物的处理技术<sup>[7-9]</sup>。猪粪含水率较高,利用水热法在一定的温度、时间、压力下发生聚合等反应后,生成的固体产物中含有的有机质、养分等含量符合我国有机肥料:NY/T 525-2021农业行业标准,具有较高的农用价值,可以作为有机肥来使用。

小白菜作为一种常见的叶菜类作物,菜根系分布浅,吸收能力弱,且生产周期短,施用化肥增产效果明显。施肥是小白菜提高养分和产量的重要措施,合理的施肥配比能协调小白菜各生育期对养分的需求<sup>[10]</sup>。

本文主要研究猪粪原料经过水热处理后的固体产物作为添加剂对土壤进行改良,探究土壤有机质、养分等基本性质的变化,通过分析小白菜的

生长性状以直观地评价水热处理猪粪作为有机肥料的改良效果,研究水热固体产物作为有机肥的实用性,以期对猪粪废弃物的资源化有效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于2022年7月至2023年10月在河南理工大学资源环境学院实验室内开展,原始土壤来源于学校西南菜园地,用作土壤培养试验原料,属于土亚类潮粘土土属,其基本理化性质详见表1。试验前将原始土壤去除石子和植物残留的根系,风干后研磨,过10目的筛子,备用。

供试新鲜猪粪采自河南省焦作市某小型私人养猪场,养猪场内的猪只通过摄入市售标准配方的猪饲料完成其生长周期,新鲜猪粪的含水率为75%,采集到实验室后用密封桶密封保存在冰柜中备用。水热试验采用反应釜作为综合反应器,可以实现物料的加热、搅拌、冷却及低高速混配的物理化学反应。反应容器内添加350 g物料和200 mL去离子水,转速为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,分别升温至120,150,180,210和240℃保温30 min后自然冷却至室温,各温度处理设置3组重复。水热处理后的产物用抽滤机进行固液分离,固体产物在烘箱中105℃烘干至恒重。

猪粪原料分别在120,150,180,210和240℃条件下的水热固体产物作为供试物料,分别命名为ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210和ZF240,

收稿日期:2024-10-29

基金项目:河南省科技攻关项目(232102321049)。

第一作者:杨英(1980-),女,硕士,讲师,从事固废资源化综合利用研究。E-mail: yangy@hpu.edu.cn。

其基本理化性质详见表 2。

种植试验供试土壤来源于花卉市场购置的营

养土,小白菜种子为种苗基地官网购买的四季市售小白菜,经过筛选留下健康饱满种子备用。

表 1 原始土壤基本理化性质

pH	EC/(mS·cm <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )
7.97	0.607	13.47	59.86	7.74	116.34

表 2 供试物料基本理化性质

处理	pH	EC/(mS·cm <sup>-1</sup> )	N/(g·kg <sup>-1</sup> )	P/(g·kg <sup>-1</sup> )	K/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	腐殖质/(g·kg <sup>-1</sup> )
ZF0	6.61	9.41	39.63	15.73	5.19	498.00	158.00
ZF120	6.38	6.88	38.16	16.04	4.83	381.03	166.54
ZF150	6.15	6.21	32.93	16.39	4.38	396.90	183.86
ZF180	5.25	5.99	29.98	17.47	3.85	599.99	275.12
ZF210	5.52	4.38	23.81	17.74	3.39	662.48	226.02
ZF240	5.67	3.16	18.32	20.70	2.78	785.95	232.89

## 1.2 方法

1.2.1 试验设计 土壤培养试验:采用盆栽试验,选用 60 mm×120 mm(上口径×高)的塑料盆。每个花盆装入原始土壤 1 kg,按照 1%的质量比,分别取 ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 供试物料 10 g 施入土壤,使其混合均匀,以原始土壤为空白对照 CK,共设置 7 组不同处理的培养试验。试验在实验室内进行,按田间最大持水量 60% 浇透水,研究不同猪粪处理对土壤的基本理化性质的影响。

小白菜种植试验:采用盆栽试验,选用 60 mm×120 mm(上口径×高)的塑料盆。每个花盆装入 2 kg 的市售营养土,按照 1%的质量比,分别施加 ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 供试物料 20 g,混合搅拌均匀,表面均匀播撒 30 粒小白菜种子,覆土 2 cm 左右,按田间最大持水量 60% 浇透水,定期进行浇水管理,分析不同猪粪处理对小白菜生长情况的影响。

1.2.2 测定项目及方法 土肥试验土壤基本性质的测定:基础土壤加入不同猪粪水热产物进行培养后的 7,21,35 和 49 d,按照五点取土法每盆取土 50 g,取后风干、研磨和过 80 目筛,放置 4 ℃ 下保存备用。将待测土样与水以 5:1 的比例浸提后,用 pH 计及电导率仪进行 pH、EC 的测定;依据 NY/T 525-2021 中重铬酸钾容量法来测定土壤有机质的含量;依据 LY/T 1228-2015 中碱解扩散法来测定土壤碱解氮的含量;依据 NY/T 1121.7-2014 中盐酸氟化铵法来测定土壤有效磷的含量;依据 NY/T 889-2004 中乙酸铵浸提火焰光度计法来测定土壤速效钾含量。

小白菜生长指标的测定:用刻度尺测定株高

(地面到最高叶片尖端的距离)与单株叶面积(叶面积=0.75×长×宽);收获时将小白菜紧贴土壤表层剪下,将地上部分别用自来水和蒸馏水清洗,擦干后称量,测定小白菜产量;称完产量后,于烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,然后用 60 ℃ 烘干至恒质量,称量测定小白菜地上部生物量;在尽量不破坏根系的情况下将根取出,用蒸馏水清洗,然后用吸水纸擦拭干净,测定每株小白菜的单根质量,再用刻度尺测量小白菜的根长;测完单根质量后,最后将根系置于烘箱中烘干至恒质量,测定小白菜地下部生物量;并计算收获指数,具体公式如下:

$$\text{收获指数} = \frac{\text{地上部生物量}}{(\text{地上部生物量} + \text{地下部生物量})}$$

1.2.3 数据分析 使用 Excel 2019 和 Origin 2021 对数据进行整理、分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 猪粪水热固体产物对盆栽土壤基本性质的影响

2.1.1 土壤 pH 如图 1 所示,与 CK 对照组相比,在整个 49 d 的培养过程中,各猪粪水热产物处理都显著降低了土壤的 pH( $P < 0.05$ ),对土壤 pH 降低效果从低到高依次是 ZF0、ZF120、ZF240、ZF150、ZF210、ZF180 处理组。不同处理组之间也存在显著性差异( $P < 0.05$ )。ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组的 pH 从添加物料后开始降低,在 21 d 时达到最低值,分别为 7.48、7.21、7.13、6.72、6.88 和 7.06, ZF180 处理组的土壤 pH 最低。在培养 21 d 后土壤的 pH 开始回升,在培养 49 d 结束时 ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组的土

壤 pH 回升至 7.73, 7.62, 7.44, 7.23, 7.32 和 7.53, 与 CK 对照组的土壤 pH 相比依然较低。

在整个培养过程中可以看出, 土壤的 pH 与添加物的 pH 以及培养时间密切相关。

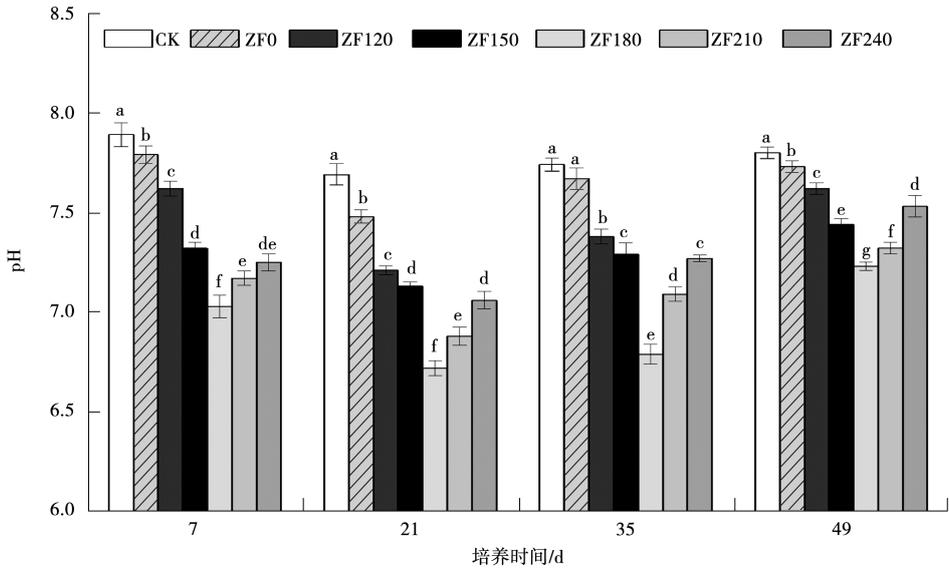


图 1 添加猪粪水热固体产物对土壤 pH 的影响

注: 不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

2.1.2 土壤 EC 如表 3 所示, 与 CK 对照组相比, 在整个 49 d 的培养过程中, 各猪粪水热产物处理都显著升高了土壤的 EC 值 ( $P < 0.05$ ), 对土壤 EC 提升效果从高到低依次是 ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组。每个不同的处理组之间也存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。在整个 49 d 的培养过程中, CK 对照组的土壤 EC 值变化不大, ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、

ZF240 处理组的土壤 EC 值一直呈上升趋势, 在第 49 天时分别达到了 0.957, 0.850, 0.792, 0.768, 0.699 和 0.678  $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 相对于原始土壤的 EC 值, 分别提高了 56.63%、39.12%、29.62%、25.70%、14.40% 和 10.97%。在整个培养的过程中可以看出, 土壤的 EC 值与添加物猪粪水热产物的初始 EC 值以及培养时间有关。

表 3 添加猪粪水热固体产物对土壤 EC 的影响

处理	EC/( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )			
	7 d	21 d	35 d	49 d
CK	0.612 ± 0.003 g	0.609 ± 0.002 g	0.603 ± 0.002 g	0.611 ± 0.002 g
ZF0	0.934 ± 0.001 a	0.942 ± 0.002 a	0.943 ± 0.003 a	0.957 ± 0.004 a
ZF120	0.834 ± 0.002 b	0.841 ± 0.002 b	0.843 ± 0.001 b	0.850 ± 0.003 b
ZF150	0.782 ± 0.004 c	0.783 ± 0.001 c	0.790 ± 0.002 c	0.792 ± 0.005 c
ZF180	0.756 ± 0.003 d	0.761 ± 0.0003 d	0.766 ± 0.001 d	0.768 ± 0.002 d
ZF210	0.683 ± 0.002 e	0.689 ± 0.002 e	0.692 ± 0.002 e	0.699 ± 0.002 e
ZF240	0.665 ± 0.001 f	0.670 ± 0.002 f	0.673 ± 0.004 f	0.678 ± 0.002 f

注: 不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

2.1.3 土壤有机质含量 如图 2 所示, 与 CK 对照组相比, 各猪粪水热产物处理在培养的整个过程中都显著提高了土壤中的有机质含量 ( $P < 0.05$ ), 对土壤中有机质含量提升效果从高到低依次是 ZF240、ZF210、ZF180、ZF0、ZF150、ZF120 处理组。在培养的 49 d 中, CK 对照组的土壤有

机质含量提升, 在 49 d 时达到了 16.99  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较原始土壤提高了 26.13%, ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组的土壤有机质含量在第 49 天时分别达到 18.76, 16.70, 18.45, 20.44, 21.03 和 21.75  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  较 CK 分别提高了 10.42%、-1.71%、8.59%、20.31%、23.78% 和 28.02%。

在整个培养过程中,处理组的土壤有机质含量在培养前 35 d 处于缓慢下降的趋势,35 d 之后趋于

稳定。从整个培养的过程来看,土壤的有机质含量与添加物猪粪水热产物的有机质含量密切相关。

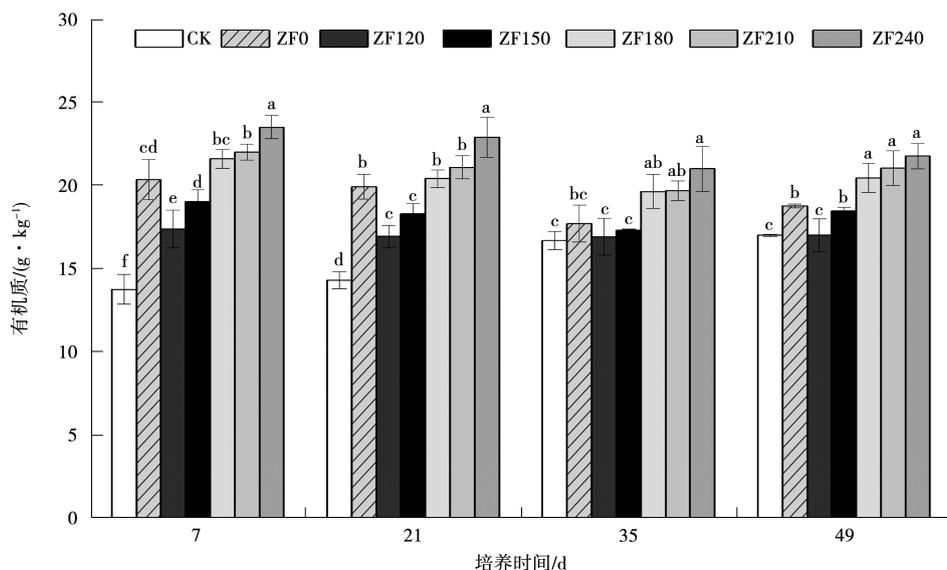


图 2 添加猪粪水热固体产物对土壤有机质含量的影响

2.1.4 土壤碱解氮含量 如图 3 所示,与 CK 对照组相比,在整个 49 d 的培养过程中,所有猪粪水热产物处理方式都显著提升了土壤中碱解氮的含量,提升效果从高到低依次是 ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组。在培养 7 和 21 d,所有处理组之间也存在显著性差异。整个 49 d 的培养过程中,CK 对照组的土壤碱解氮含量无太大变化,所有处理组的土壤碱解氮含量从

猪粪水热产物后呈下降趋势,在 21 d 时降到最低值,从 21 d 到培养结束,土壤中碱解氮含量无较大变化,处于稳定状态。培养结束时对照组土壤碱解氮含量为  $61.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 的土壤碱解氮含量分别为 85.22,84.32,80.67,79.99,78.49 和  $76.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相较于对照组分别增加了 37.54%、36.09%、30.20%、29.10%、26.68%和 22.85%。

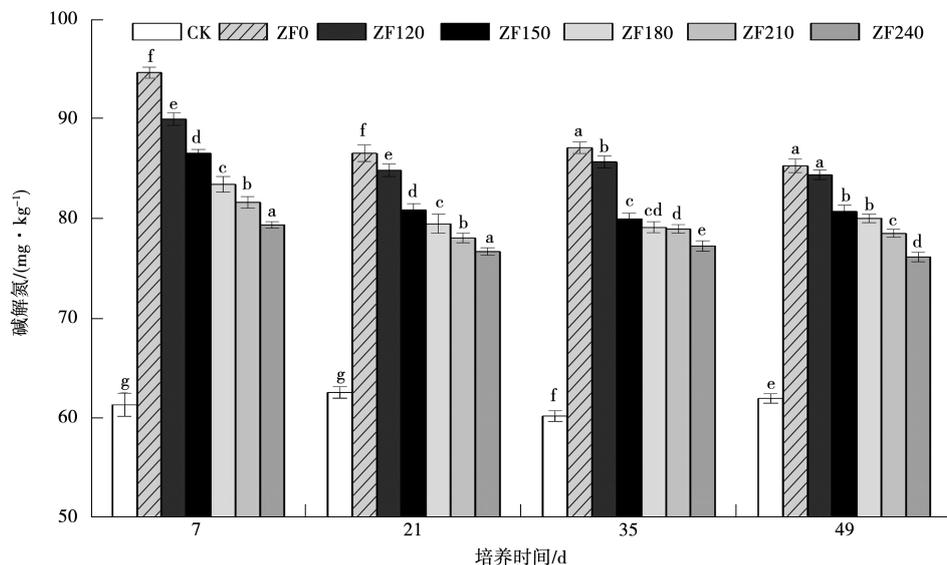


图 3 添加猪粪水热固体产物对土壤碱解氮含量的影响

2.1.5 土壤有效磷含量 如图 4 所示,与 CK 对照组相比,在整个 49 d 的培养过程中,所有猪粪

水热产物处理都显著提升了土壤中有效磷的含量。同时,在整个培养过程中,除了 ZF120、ZF150

处理组之间没有显著性差异之外,其余的不同处理组之间存在着显著性差异。在整个49 d的培养过程中,对土壤中有有效磷含量的提升效果从高到低依次是ZF240、ZF210、ZF180、ZF150、ZF120、ZF0处理组,CK对照组的土壤有效磷含量无太大变化,各处理组的土壤有效磷含量从添加物料

后呈下降趋势,在21 d时降到最低值,之后开始回升。培养结束时各处理组的土壤有效磷含量从高到低分别为16.29、14.11、12.87、12.56、11.97和10.34  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相较于对照组分别增加了104.65%、77.26%、61.78%、57.79%、50.38%和29.90%。

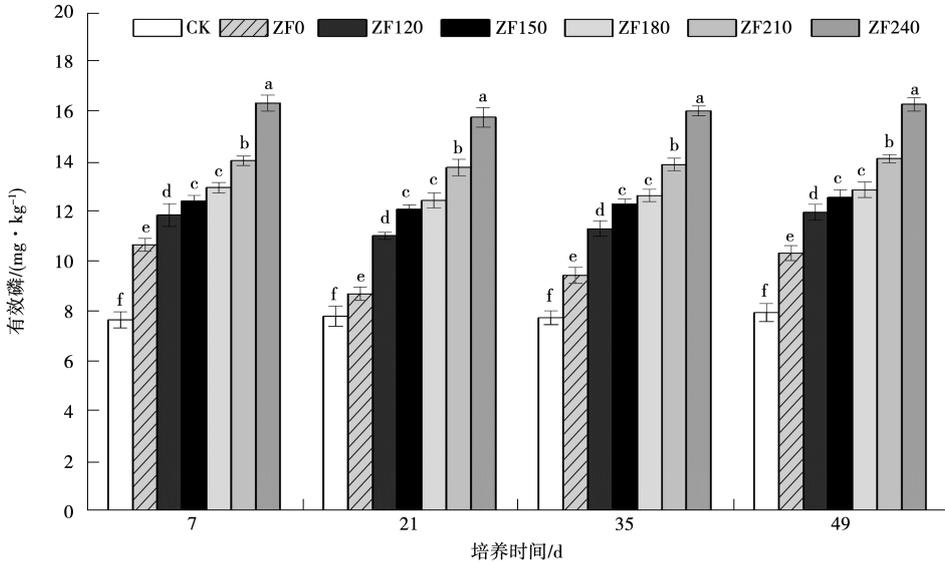


图4 添加猪粪水热固体产物对土壤有效磷含量的影响

2.1.6 土壤速效钾含量 如图5所示,与CK对照组相比,在整个49 d的培养过程中,所有组都显著提高了土壤中速效钾的含量,对土壤中速效钾含量的提升效果从高到低依次是ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240处理组。同时,在整个49 d的培养过程中,所有处理组之间也存在

显著性差异。在49 d培养结束后,ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240处理组的土壤速效钾含量分别为224.98、199.04、188.32、180.45、172.48和163.56  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与CK对照组相比分别增加了53.28%、35.64%、28.30%、22.94%、17.51%和11.43%。

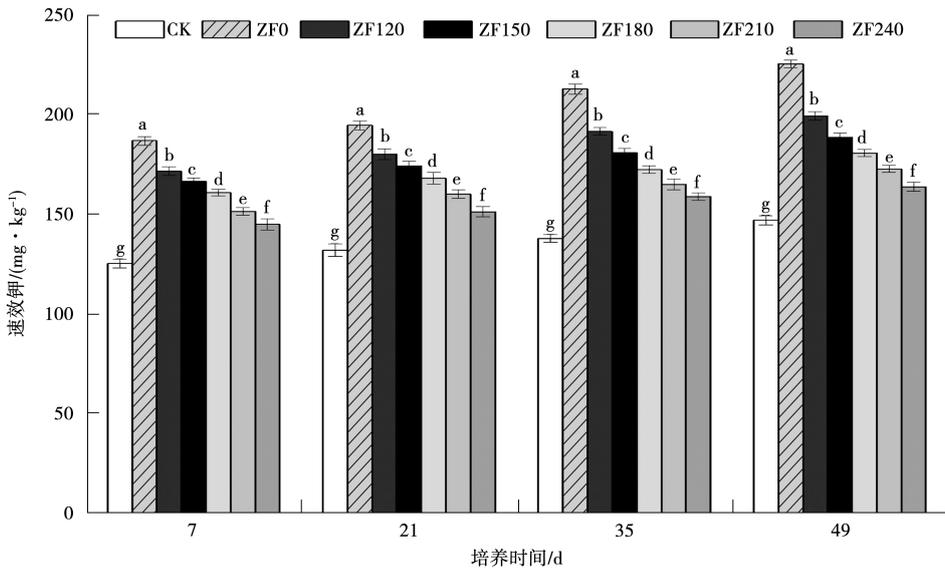


图5 添加猪粪水热固体产物对土壤速效钾含量的影响

## 2.2 猪粪水热固体产物对小白菜生长状况的影响

2.2.1 对不同时期小白菜外观的影响 由图 6 可以看出,与 CK 对照组相比,在种植 10 d 时,猪粪水热产物处理组的小白菜从外观上看长势没有太大差异,说明施加物料对前期的小白菜生长没有太大影响。由图 7 可以看出,ZF150、ZF180、ZF210、ZF240 处理组的小白菜从外观上看长势优于 CK 对照组,说明添加物料后在种植 30 d 时对小白菜生长情况已经产生了促进作用。由图 8

可以看出,在种植 60 d 时,每个处理组的小白菜从外观上看长势都优于 CK 对照组,说明在种植 60 d 后,所有猪粪水热产物处理组与 CK 对照组相比对小白菜的长势都有促进作用。由图 9 可以看出,在种植 60 d 时,所有处理组的小白菜的根系从外观上看都要优于 CK 对照组,特别是 ZF150、ZF180、ZF210 处理组的小白菜的根系与 CK 对照组相比明显粗壮。所以可以推断出猪粪及其水热固体产物作为土壤改良剂添加到土壤中对小白菜的生长有正向作用。

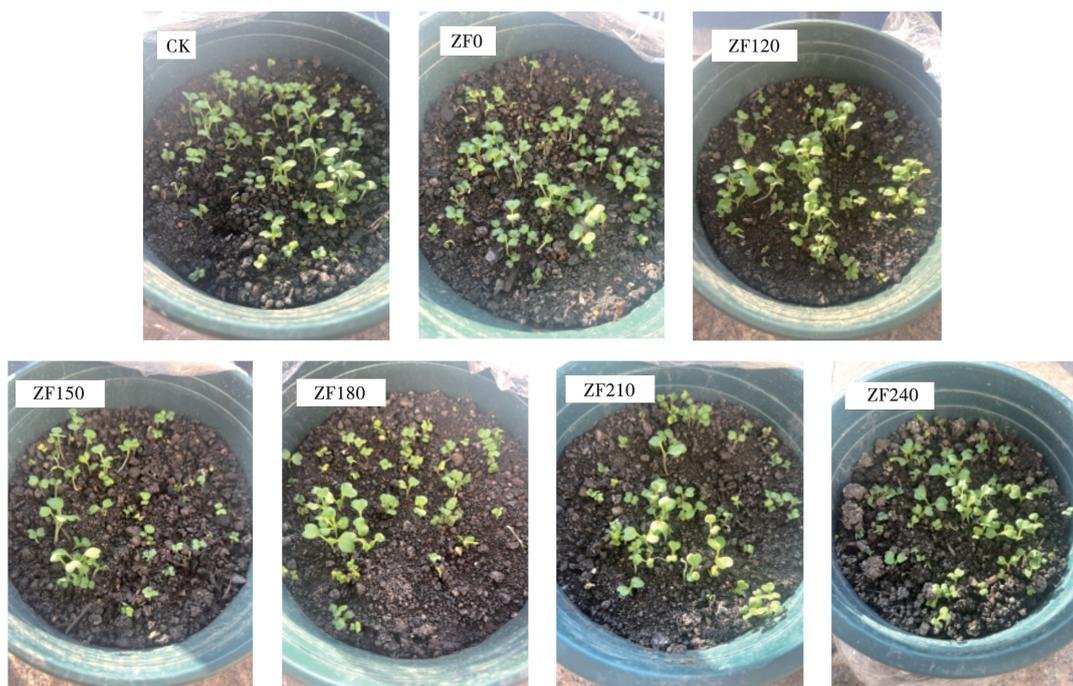


图 6 第 10 天小白菜长势情况



图 7 第 30 天小白菜长势情况



图8 第60天小白菜长势情况



图9 第60天小白菜的根部长势情况

2.2.2 对种植第60天时小白菜生长性状的影响

由表4可以看出,与CK对照组相比,经过60d的种植,所有处理组的小白菜产量、地上生物量、地下生物量、株高、单株叶面积、根长、单根质量都显著增加,各猪粪水热产物处理(ZF0、ZF120、ZF150、ZF180、ZF210、ZF240)与CK对照组相比小白菜的产量分别增加了25.00%、66.30%、122.80%、225.17%、84.12%、39.36%;各处理组小白菜地上生物量分别增加了25.11%、66.43%、

122.96%、225.39%、84.12%、39.36%;各处理组的小白菜株高分别增加了17.32%、23.14%、42.61%、61.50%、45.69%和37.06%;各处理组的小白菜单株叶面积分别增加了14.37%、18.09%、40.39%、104.78%、67.62%和48.12%;各处理组的小白菜根长分别增加了18.22%、46.22%、65.11%、90.67%、45.11%和41.78%;除了ZF0处理组之外,所有处理组的收获指数都显著低于CK( $P < 0.05$ )。

表4 不同处理对种植第60天小白菜的生长性状的影响

处理	产量/g	生物量/g		株高/cm	单株叶面积/cm <sup>2</sup>	根长/cm	单根质量/g	收获指数
		地上部	地下部					
CK	11.84±0.94 g	0.697±0.02 g	0.029±0.01 e	15.30±0.75 e	63.24±1.07 f	4.50±0.003 e	0.147±0.003 f	0.96±0.003 a
ZF0	14.80±0.45 f	0.872±0.04 f	0.040±0.03 e	17.95±0.21 d	72.33±2.03 e	5.32±0.012 d	0.174±0.001 e	0.96±0.001 a
ZF120	19.69±1.01 d	1.160±0.01 d	0.118±0.02 d	18.84±0.90 d	74.68±1.24 e	6.58±0.031 c	0.751±0.005 b	0.91±0.007 b
ZF150	26.38±0.63 b	1.554±0.03 b	0.176±0.01 b	21.82±0.12 c	88.78±1.09 d	7.43±0.032 b	0.792±0.002 b	0.90±0.003 b
ZF180	38.50±1.45 a	2.268±0.06 a	0.559±0.04 a	24.71±0.78 a	129.50±3.21 a	8.58±0.054 a	2.020±0.001 a	0.80±0.006 d
ZF210	21.80±0.98 c	1.284±0.03 c	0.187±0.02 b	22.29±0.45 b	106.00±1.97 b	6.53±0.013 c	0.607±0.004 c	0.87±0.002 c
ZF240	16.50±0.33 e	0.972±0.01 e	0.153±0.01 c	20.97±0.22 c	93.67±2.31 c	6.38±0.026 c	0.550±0.006 d	0.86±0.003 c

通过对表 4 中的不同处理下的小白菜的生长性状情况进行分析,发现添加猪粪水热固体产物对小白菜产量、地上生物量、地下生物量、株高、单株叶面积、根长、单根质量都有积极作用。整体上来说,所有处理组与 CK 对照组相比都对小白菜的生长有促进作用,其中 ZF180 处理组对小白菜的所有性状的提升表现最好。

### 3 讨论

#### 3.1 猪粪水热固体产物对土壤性质的影响

3.1.1 土壤 pH 和 EC 研究结果显示,从培养开始到 21 d 时,土壤的 pH 与培养时间呈现负相关关系,这是由于猪粪及其水热固体产物本身呈酸性,加入土壤后中和了土壤的酸碱度,所以能够在较短时间内降低土壤的 pH。而且,当猪粪水热固体产物施加到土壤中后,能够促进土壤中的物质转化、发生化学反应,在这些物质发生化学反应的过程中可能会生成一些酸性物质,同时土壤中的微生物的代谢活动也会生成一些酸性基团,这些酸性物质有一部分会保留到土壤中,所以培养前期土壤的 pH 显著下降<sup>[11]</sup>。猪粪水热产物处理组在 21~49 d 时,土壤的 pH 有所回升,这种现象可能是由于猪粪及其水热固体产物中含有 K、Ca 等灰分元素,这些灰分元素能够溶于土壤中,可以对土壤中盐基饱和度进行改善,所以土壤的 pH 有所提升。这一现象与前人等<sup>[12-13]</sup>的研究结果一致。另有研究表明,培养后期土壤 pH 回升的另一个原因可能是添加猪粪水热固体产物会对土壤中微生物的还原反应具有促进作用,会增加微生物的活性<sup>[14-15]</sup>。

随着培养时间的增长,土壤的 EC 值呈缓慢上升趋势,原因可能是猪粪水热固体产物本身就具有很高的电导率,当作为添加物施加到土壤中后相当于直接往土壤中加入了大量的外源性盐离子,所以土壤的电导率能够在较短的时间内得到大幅提升。Qin 等<sup>[16]</sup>研究发现,当添加物中含有较高的灰分元素时,加入土壤后能够对土壤的电导率有提升效果。而且,猪粪水热固体产物中含有大量的有机质,这些有机质在微生物的作用下分解的同时也会产生一些矿质盐分,这些矿质盐分也会导致土壤的电导率增加。

3.1.2 土壤有机质含量 俞盈等<sup>[17]</sup>研究表明,猪粪水热固体产物是高碳材料,其有机质含量非

常高,施加到土壤中相当于直接向土壤中输入了大量的外源性有机质,所以土壤中有机的含量在短时间内可得到大幅度提升。本研究中,猪粪水热产物处理组的土壤有机质含量较于对照组明显升高,这与杜忍让等<sup>[18]</sup>研究结果相似。此外,处理组的土壤有机质含量在培养过程中先下降后趋于稳定。这可能是由于土壤以及猪粪水热固体产物中含有较多的不稳定组分,这些不稳定组分在培养过程中会发生矿化作用<sup>[19]</sup>。而且,猪粪水热固体产物的表面由丰富的芳香环结构组成,具有高度的芳构化程度<sup>[20]</sup>。这种结构具有较强的生物稳定性,这与韩玮等<sup>[21]</sup>的研究结果相似。

3.1.3 土壤碱解氮含量 Melo 等<sup>[22]</sup>比较了水热转化污泥和矿物肥料在盆栽试验中对土壤性质的影响,证实了猪粪及其水热固体产物本身含有大量的氮元素,施加到土壤中后相当于直接向土壤中施加了大量的氮源,水热固体产物可通过矿化作用将自身的有效氮释放到土壤中,所以培养初期土壤中的碱解氮含量和 CK 对照组相比显著提高( $P < 0.05$ )。培养前期,处理组的土壤碱解氮含量下降。Subedi 等<sup>[23]</sup>与 Bargmann 等<sup>[24]</sup>均认为是微生物的固氮作用导致土壤溶液中的矿质氮浓度降低。还有研究发现,猪粪及其水热固体产物中可能具有氧化官能团,此官能团可以吸附土壤中的硝酸盐,所以会导致土壤中碱解氮含量降低<sup>[25]</sup>,这与本研究结果一致。

3.1.4 土壤有效磷含量 朱陆伟等<sup>[26]</sup>的研究表明猪粪及其水热固体产物本身含有大量的磷元素,施加到土壤中后相当于直接向土壤中施加了大量的磷源,所以施加材料后土壤中有效磷的含量在较短时间内有显著提升( $P < 0.05$ )。培养 7 d 到 21 d 时,土壤中有效磷的含量有所下降,可能是由于土壤颗粒的吸附、解吸、阻塞沉淀、溶解沉淀,或者是土壤中微生物的迁移或固定化造成的<sup>[27-28]</sup>。本研究中,在 21 d 之后,土壤中有效磷含量回升。Christel 等<sup>[29]</sup>认为猪粪水热固体产物适合做磷的缓释肥料,比市面上普通的矿物磷肥料磷损失到水环境中的风险要低。

3.1.5 土壤速效钾含量 处理组土壤速效钾含量较 CK 对照组相比显著提升( $P < 0.05$ ),原因可能是猪粪及其水热固体产物本身含有大量的钾元素,施加到土壤中后相当于直接向土壤中施加

了大量的钾源。Bento 等<sup>[30]</sup>在评估水炭的养分释放试验中也发现在土壤中添加水热产物后土壤中的钾元素含量有大幅提升。刘建军等<sup>[31]</sup>将猪粪作为露地黄瓜的有机肥后也观察到了类似现象。

### 3.2 猪粪水热固体产物对小白菜生长状况的影响

本研究中,不同温度处理下的猪粪水热处理产物对小白菜生长的影响存在显著差异。其中 180 °C 处理组小白菜的生长性状达到了最佳,与 CK 对照组相比,ZF180 处理组小白菜产量、地上生物量、株高、单株叶面积、根长分别增加了 225.17%、225.39%、61.50%、104.78% 和 90.67%。这可能与 ZF180 处理组中腐殖质含量和腐殖化率最高有关。相比之下,较低温度处理组(如 ZF120 和 ZF150)虽然也对土壤性质和小白菜生长有改善作用,但效果相对较弱。而较高温度处理组(如 ZF210 和 ZF240)虽然在某些指标上仍表现出改善作用,但可能由于高温导致部分有效成分的破坏或转化,使得整体效果不如 ZF180 处理组。

综上所述,180 °C 水热处理温度是猪粪废弃物资源化利用的最适温度。这一发现对于实际生产具有重要的借鉴意义。通过采用 180 °C 水热处理技术,可以将猪粪废弃物转化为高效的有机肥料。在实际应用中,可以考虑将猪粪水热处理产物与其他有机废弃物或无机肥料进行复配使用,以进一步提高其肥效。

本研究仅关注了土壤性质和小白菜生长的几个关键指标,未全面评估处理产物对土壤微生物群落、土壤酶活性等方面的影响。后续应增加这些方面的评估内容,以便更全面地了解处理产物对土壤生态系统的综合影响。

## 4 结论

在 49 d 的土壤培养试验中,所有添加猪粪水热产物处理组相较于对照组(CK)显著降低了土壤 pH,同时提高了土壤中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量以及 EC 值。其中 ZF180 处理组效果最为显著,与 CK 对照组相比,碱解氮、有效磷、速效钾、有机质及 EC 分别提升了 29.10%、61.78%、22.94%、20.31% 和 25.70%。在小白菜种植试验中,添加猪粪水热产物的处理组均对小白菜的生长参数有积极影响,尤其是 ZF180 处理组,与 CK 对照组相比,产量、地上生物量、株

高、单株叶面积和根长分别增加了 225.17%、225.39%、61.50%、104.78% 和 90.67%。此外,180 °C 的水热处理温度被认为是猪粪废弃物资源化利用的最佳温度。

### 参考文献:

- [1] 黎运红. 畜禽粪便资源化利用潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- [2] 张晶. 规模化猪场粪污处理与资源化利用浅谈[J]. 饲料与畜牧,2017(10):1.
- [3] 周谈龙, 高斌, 董红敏, 等. 中试规模猪粪堆肥挥发性有机物排放特征[J]. 农业工程学报,2017,33(6):192-198.
- [4] CORBALAROBLES L, SASTAFIANA W N D, van LINDEN V, et al. Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application-a tradeoff story[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 131: 86-98.
- [5] 陈黎. 猪粪资源化利用技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [6] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学,2020,41(2):986-996.
- [7] HELGESON H C. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures[J]. American Journal of Science, 1969, 267(7): 729-804.
- [8] CAO X Y, RO K S, LIBRA J A, et al. Effects of biomass types and carbonization conditions on the chemical characteristics of hydrochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(39): 9401-9411.
- [9] HOEKMAN S K, BROCH A, ROBBINS C, et al. Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2013, 3(2): 113-126.
- [10] 孙佳玉, 吴瑕, 王鹏, 等. 不同鸡粪用量对小白菜干物质积累和养分吸收的影响[J]. 黑龙江农业科学,2019(12):65-68.
- [11] MELO T M, BOTTLINGER M, SCHULZ E, et al. Management of biosolids-derived hydrochar (Sewchar): Effect on plant germination, and farmers' acceptance[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 237: 200-214.
- [12] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1): 920.
- [13] GASKIN J W, SPEIR R A, HARRIS K, et al. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(2): 623-633.
- [14] RILLIG M C, WAGNER M, SALEM M, et al. Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45(3): 238-242.
- [15] LIBRA J A, RO K S, KAMMANN C, et al. Hydrothermal

- carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis[J]. *Biofuels*, 2011, 2(1): 71-106.
- [16] QIN P, WANG H L, YANG X, et al. Bamboo and pig-derived biochars reduce leaching losses of dibutyl phthalate, cadmium, and lead from cocontaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2018, 198: 450-459.
- [17] 俞盈, 韩兰芳, 姜晓满. 水热炭的制备、结构特征和应用 [J]. *环境化学*, 2018, 37(6): 1232-1244.
- [18] 杜忍让, 王一民, 王刚弟, 等. 发酵猪粪对果园土壤 pH 及有机质含量影响研究 [J]. *家畜生态学报*, 2018, 39(11): 75-78.
- [19] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系 [J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [20] ZHANG Z K, ZHU Z Y, SHEN B X, et al. Insights into biochar and hydrochar production and applications: a review [J]. *Energy*, 2019, 171: 581-598.
- [21] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5838-5846.
- [22] MELO T M, BOTTLINGER M, SCHULZ E, et al. Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar) [J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 338-348.
- [23] SUBEDI R, KAMMANN C, PELISSETTI S, et al. Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? [J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66(6): 1044-1053.
- [24] BARGMANN I, MARTENS R, RILLIG M C, et al. Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 59-67.
- [25] PRATIWI E P A, HILLARY A K, FUKUDA T, et al. The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil [J]. *Geoderma*, 2016, 277: 61-68.
- [26] 朱陆伟, 石慧, 王伟, 等. 施用猪粪后果园土壤中养分含量的动态变化 [J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(3): 38-44.
- [27] HANSEN H C B, HANSEN P E, MAGID J. Empirical modelling of the kinetics of phosphate sorption to macropore materials in aggregated subsoils [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(2): 317-327.
- [28] FROSSARD E, CONDRON L M, OBERSON A, et al. Processes governing phosphorus availability in temperate soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 15-23.
- [29] CHRISTEL W, BRUUN S, MAGID J, et al. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169: 543-551.
- [30] BENTO L R, CASTRO A J R, MOREIRA A B, et al. Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse [J]. *Geoderma*, 2019, 334: 24-32.
- [31] 刘建军, 高婷, 刘希财. 猪粪对露地黄瓜产量及土壤培肥效果的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2012(1): 42-44.

## Effects of Hydrothermal Treatment Products from Pig Manure on Soil Properties and Growth of Chinese Cabbage

YANG Ying, BAO Xingxing, ZHAO Yanqi, ZHAI Zimeng

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** In order to explore the ways of pig manure waste recycling, the hydroheat treatment products of pig manure under different temperatures were used as additives, the soil characteristics were studied, and the improvement effect of hydroheat products on soil was verified through the cabbage planting experiment. The results showed that compared with CK, at 49 days of planting, each hydroheat treatment products of pig manure treatment group significantly reduced the pH, and the alkali nitrogen, effective phosphorus, quick potassium, organic matter and EC were significantly improved in all treatment groups, among which the alkaline hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter and EC increased by 29.10%, 61.78%, 22.94%, 20.31% and 25.70%, respectively. At 60 days of planting, the fresh weight, biomass, single plant height, leaf area of single plant, root length, root weight and harvest index of Chinese cabbage all improved, among which the growth traits of ZF180 treated group were the best. Compared with the CK control group, the Chinese cabbage yield, aboveground biomass, single plant height, single plant leaf area, and root length increased by 225.17%, 225.39%, 61.50%, 104.78%, and 90.67%, respectively. Therefore, 180 °C hydrothermal treatment temperature is the optimal temperature for pig manure waste recycling.

**Keywords:** pig manure waste; hydrothermal products; temperature; soil properties; Chinese cabbage