

蚯蚓对牛粪中碳、氮及其他营养物质转化的影响

陆 钰¹, 张正旺¹, 闫晓明², 王荣富^{1*}, 何成芳², 陶 敬², 陈志豪², 董雪云²

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院食品加工研究所, 合肥 230036)

摘 要: 试验地位于安徽肥东县桂和养牛场, 选择 6 个地块作为消解床, 新鲜奶牛粪采用均匀堆垄铺在消解床上。分析了 60 d 内奶牛粪便自然堆制和蚯蚓堆制 2 种处理方式的堆制物的理化性质。结果表明, 蚯蚓粪 pH、总碳、有机碳、全氮、全钾含量均低于传统的牛粪自然堆制物, 全磷、速效磷、速效氮和速效钾均高于牛粪自然堆制物, 蚯蚓粪的速效氮和速效磷占全氮和全磷的百分比均分别逐渐升高。由此认为, 与自然堆制相比, 牛粪蚯蚓堆制加快了堆制物矿化速率, 提高了堆制物速效养分含量。

关键词: 奶牛粪; 蚯蚓; 牛粪自然堆制; 牛粪蚯蚓堆制

中图分类号: X713

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2016)03-0467-07

Effect of earthworm on conversion of carbon, nitrogen and other nutrients in cow dung

LU Yu¹, ZHANG Zhengwang¹, YAN Xiaoming², WANG Rongfu¹,
HE Chengfang², TAO Jing, CHEN Zhihao², DONG Xueyun²

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Agro-products Processing Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230036)

Abstract: Six plots were used as the earthworm digestion bed on the Guihe cattle farm in Feidong county, Anhui. New milk cow dung was heaped by uniform ridge in the bed. The experiment compared the changes of the physical and chemical properties between natural composting and earthworm composting (vermicomposting) treatments. Results showed that pH, total carbon, organic carbon, total nitrogen, total potassium content of the earthworm composting treatment were lower than the traditional natural composting material. The total phosphorus, available phosphorus, available nitrogen, and available potassium were higher in the earthworm than the natural composting treatment. Percentages of available nitrogen and available phosphorus in the cow dung treated with earthworms gradually increased. The cow dung vermicomposting accelerates the mineralization of the composting material and thus improves the available nutrient content.

Key words: cow dung; earthworm; cow dung natural composting; cow dung vermicomposting

近 20 多年我国畜禽养殖业获得了高度集约化的发展, 伴随这种变化, 全国每年约产生 26 亿 t 的畜禽粪便, 这些未经处理的畜禽粪便对环境产生了严重危害^[1-2]。目前, 如何有效的处理养殖业废弃物, 降低环境污染已成为一个亟需解决的问题。而牛粪蚯蚓堆制技术是近 20 年逐渐发展的古老而又新型废弃物资源化利用技术, 该技术结合传统堆肥法与生物处理法, 由于蚯蚓具有食性广, 体内能够分泌多种水解酶等特性, 牛粪通过蚯蚓体内新陈代谢作

用被转化为具有优良物理、化学和生物学特性的蚯蚓粪^[3-5]。但多年来国内外学者的研究^[6-15]是侧重于对蚯蚓堆制处理的蚓种选择和处理条件的探索上。李辉信等^[16]对蚯蚓消解的堆制物的理化性质作出了一定研究, 但其主要室内小型模拟实验, 缺乏实际推广作用。而本研究是在养牛场养殖区内, 按照实际养殖区条件进行蚯蚓堆制定位实验, 通过对蚯蚓牛粪堆制和牛粪自然堆制两种堆制方式的对比, 探析牛粪过程中理化学性质、碳素以及其他养分含

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD14B)资助。

作者简介: 陆 钰, 硕士研究生。E-mail: 251907022@qq.com

* 通信作者: 王荣富, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: rfwang@ahau.edu.cn

量的变化规律,以期为适度规模化养牛场奶牛粪便资源化利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选用的蚯蚓大平2号蚯蚓品种为赤子爱胜蚓,购自合肥市肥东县桂合蚯蚓养殖厂,所用的牛粪采集于肥东桂合养牛场的新鲜牛粪,基质取于蚯蚓养殖旁边的土壤。实验位于安徽中部的肥东县,地理坐标介于东经117°19′~117°52′与北纬31°34′~32°16′之间,属亚热带季风气候,四季分明,光照充足,雨量适中,气候温和,年平均气温15.8℃,年平均降水量993 mm,空气年平均湿度75%。2015年4月日均最高气温21℃,日均最低气温12℃,平均降水量为91 mm,5月日均最高气温26℃,日均最低气温17℃,平均降水量为96 mm。

表1 处理前奶牛粪便的理化性质

Table 1 The physicochemical property of cow dung before

物料 Material	pH	全氮/g·kg ⁻¹ Total N	全磷/g·kg ⁻¹ Total P	全钾/g·kg ⁻¹ Total K	速效氮/mg·kg ⁻¹ Available N	速效磷/mg·kg ⁻¹ Available P	速效钾/mg·kg ⁻¹ Available K
牛粪 Cow dung	8.89	18.03	5.02	5.49	1170	2021	324.67

1.2.2 测定方法 pH的测定:用pHs-3c型pH计来测量。称取5~10 g鲜样,按照1/10 (wet weight/volume)的比例用去离子水浸提,振荡2 h,用pH计测试上清液,用pH计测定^[17]。

有机碳的测定:采用重铬酸钾—外加热法测定^[18]。

总碳的测定:德国elementar全自动元素分析仪测定。

全氮的测定:德国elementar全自动元素分析仪测定。

全磷的测定:采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—分光光度法测定^[19]。

全钾的测定:采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—火焰光度法测定^[20]。

速效氮的测定:采用0.05 mol·L⁻¹硫酸溶液浸提—凯氏定氮法测定^[21]。

速效磷的测定:采用2%(m·V⁻¹)柠檬酸浸提—分光光度法测定^[22]。

速效钾的测定:采用1 mol·L⁻¹稀硝酸浸提—火焰光度法测定^[23]。

1.2.3 数据处理分析 数据用Origin8软件进行处理绘图,用SPSS Statistics 19软件进行统计分析。

1.2 方法

1.2.1 实验设计 试验地为肥东县桂和养牛场,选择6个10 m×1.5 m [L(长)×W(宽)]地块作为消解床,各消解床间相距1 m,作为保护行。新鲜奶牛粪采用均匀堆垄铺在消解床上,高度为0.2 m。3个消解床中每100 kg牛粪投放2 kg蚯蚓,约5000条,作为试验组;3个消解床不加蚯蚓,作为对照组。盖上稻草,避免阳光照射。在蚯蚓处理牛粪期间,每隔5 d就调节1次水分,使其维持在1个相对湿度70%,有利于蚯蚓生长的生活环境。提供接种蚯蚓当天取牛粪作为基础样(见表1),每隔10 d采用环刀法,各消解床随机取3点样,时间从2015年4月开始到5月底,历时60 d。将样品风干、粉碎,过100目筛后,测定总碳、有机质、全氮、全磷、全钾含量测定。过20目筛的样品测定pH、速效氮、速效磷和速效钾。

2 结果与分析

2.1 牛粪蚯蚓堆制过程中物理化学性质的变化

蚯蚓消解奶牛粪是蚯蚓自身新陈代谢的过程,牛粪等有机质通过蚯蚓砂囊机械研磨和体内生物化学作用不断被降解和转化,最终生成蚯蚓粪。

2.1.1 牛粪蚯蚓堆制物 pH 的变化 方差分析($P<0.05$)显示(表2),NC(牛粪自然堆制)和VC(牛粪蚯蚓堆制)堆制物pH随着时间均存在差异显著性降低,这与朱晓玲^[24]等的研究是基本一致的,新鲜奶牛粪pH呈弱碱性,主要是因为奶牛胃中特殊菌群导致其代谢产物中NH₄⁺含量较高,自然堆制的牛粪和蚯蚓堆制处理牛粪在堆制初期均会释放NH₃,因此两种处理过程中堆制物pH均降低。从第30天起NC和VC2种堆制处理方式之间pH存在显著性差异($P<0.05$),可能因为初期奶牛粪pH偏高,蚯蚓体小,蚯蚓代谢活动弱,2种处理均处于自然发酵过程;随着牛粪中NH₃释放,pH逐渐降低到蚯蚓代谢活动所需的适宜水平,蚯蚓增大,体蚯蚓代谢活动增强,进而2种处理方式pH变化产生差异。导致这种差异的可能原因是,牛粪自然堆制过程中表面形成结皮层,内部氧气供应不足,抑制硝化细菌将NH₄⁺氧化为NO₃⁻的硝化作用,

因此牛粪自然堆制 pH 下降幅度较小。牛粪蚯蚓堆制过程中, 蚯蚓的活动增大了牛粪表面孔隙率, 氧气供应充足, 利于硝化细菌的硝化作用; 蚯蚓消化道内存在多种水解酶, 牛粪中多种复杂有机质经蚯蚓降解生成碳水化合物等简单小分子物质, 这些简单小分子物质与土壤结合形成性质稳定、pH 趋于中性的蚯蚓粪, 因此蚯蚓消解牛粪 pH 下降幅度较大。

表 2 NC 和 VC 堆制物的 pH 变化

堆制时间/d Composting time	自然堆制物 Natural composting	蚯蚓堆制物 Vermicomposting
0	8.89±0.15 ^{aA}	8.89±0.15 ^{aA}
10	8.66±0.13 ^{bA}	8.65±0.24 ^{abA}
20	8.45±0.07 ^{cA}	8.33±0.14 ^{bA}
30	8.31±0.02 ^{cdB}	7.92±0.23 ^{cA}
40	8.19±0.06 ^{dB}	7.7±0.06 ^{cdA}
50	7.19±0.06 ^{EB}	7.6±0.11 ^{cdA}
60	7.88±0.04 ^{EB}	7.48±0.04 ^{dA}

注: 小写字母表示纵向比较, 大写字母表示横向比较; 不同处理间字母相同表示无显著差异, 字母不同表示显著性差异 ($P<0.05$), 多重比较采用 Duncan's 法。下表同。

Note: Lowercase letters indicate the longitudinal comparison, capital letters indicate transverse comparison. Same letters indicate no significant difference, different letters represent significant difference ($P<0.05$), Duncan's method. The same below.

2.1.2 牛粪蚯蚓堆制过程中碳含量的变化 土壤作为地球陆地表面最大的碳库, 对全球碳循环起着重要的作用。整个土壤生态系统中, 蚯蚓作为分解者, 在土壤中一系列的生命活动影响了碳流动和碳储量, 在土壤生态系统碳素循环过程中发挥了重要作用。

表 3 NC 和 VC 堆制物总碳含量变化

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	40.13±0.25 ^{aA}	40.13±0.25 ^{aA}
10	37.75±0.25 ^{bA}	37.40±0.07 ^{bA}
20	35.47±0.16 ^{cA}	35.31±0.23 ^{cA}
30	33.35±0.06 ^{dA}	32.50±0.09 ^{dB}
40	31.36±0.04 ^{eA}	29.20±0.25 ^{EB}
50	31.03±0.39 ^{fA}	26.08±0.19 ^{EB}
60	30.95±0.37 ^{fA}	26.08±0.15 ^{EB}

(1) 总碳含量的变化。由表 3 知, NC 和 VC 的总碳含量随着时间均存在差异显著性 ($P<0.05$) 降低, 0 d 新鲜奶牛粪总碳百分含量最高为 40.1%, 60 d 时 NC 产物腐熟牛粪总碳含量为 30.9%, VC 产物蚯蚓粪总碳含量 26.1%, 两者总碳含量分别下降 9.1%和 13.9%, 从第 30 天后 NC 和 VC 两种堆制处理方式之间总碳含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。笔者认为因为前期蚯蚓代谢活动弱, 对牛粪消解作用有限。从 30~60 d 期间, 由于蚯蚓代谢活动逐渐增强, 对牛粪的消解作用明显, 总碳含量降幅大, 而 NC 堆制物自然腐熟仅能依靠内部微生物代谢活动, 总碳含量降幅小。最终, VC 堆制产物蚯蚓粪总碳含量显著低于 NC 堆制产物腐熟牛粪总碳含量。

表 4 NC 和 VC 的总有机碳含量变化

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	36.23±0.21 ^{aA}	36.23±0.21 ^{aA}
10	35.22±0.34 ^{bA}	32.29±0.22 ^{bB}
20	34.03±0.17 ^{cA}	27.50±0.06 ^{EB}
30	32.79±0.29 ^{dA}	23.21±0.28 ^{dB}
40	29.48±0.15 ^{eA}	22.31±0.19 ^{EB}
50	29.41±0.13 ^{eA}	20.42±0.21 ^{EB}
60	29.41±0.12 ^{eA}	20.39±0.05 ^{EB}

(2) 总有机碳含量的变化。方差分析 ($P<0.05$) 结果表明 (表 4), NC 和 VC 的总有机碳含量在堆制过程中存在差异显著性降低, 0 d 鲜牛粪总有机碳百分含量最高为 36.2%, 60 d 时 NC 产物腐熟牛粪总有机碳含量为 29.5%, VC 产物蚯蚓粪总有机碳含量最低为 20.4%。两者总有机碳含量分别下降 6.7%和 15.8%, 其中 VC 总有机碳含量下降幅度大。40~60 d 各阶段 NC 总有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$), 推测牛粪自然堆制在 40 d 左右可获得腐熟牛粪。50~60 d 阶段 VC 总有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$), 此阶段蚯蚓消解作用趋于结束, 推测牛粪蚯蚓堆制在 50 d 左右可获得蚯蚓粪。第 10 天后, NC 和 VC 2 种堆制方式之间堆制物有机碳含量差异显著 ($P<0.05$), 蚯蚓消解牛粪实质上是蚯蚓与相关微生物协同异化及同化作用的过程, 进而促进物料有机质的降解和矿化速度, 在此过程中大量的碳以 CO_2 形式损失掉。相关研究表明^[15], 蚯蚓消化道内存在丰富多样的酶, 包括纤维素酶、蛋白酶和脂肪酶等。在这些酶的作用下, 有机质高分子化合物被

水解成简单小分子碳水化合物,从而为堆制物中的细菌等微生物提供了充足的养分,同时由于蚯蚓的活动提高了堆制物中氧气含量,优化了微生物的生长环境,最终促进了微生物的增殖。大量增殖的微生物和蚯蚓协同消解牛粪中有机质,有机碳含量大幅降低。而牛粪自然堆制过程中会出现70~80℃的高温阶段,堆制物中细菌增殖受到抑制,有机质降解速度缓慢。

(3) 总碳含量与总有机碳含量的变化比较。图1显示了NC总碳、总有机碳及总有机碳占总碳百分比的变化情况,总碳与总有机碳均呈下降趋势,整个过程中总有机碳占总碳含量百分比变化不明显,保持在95%左右。

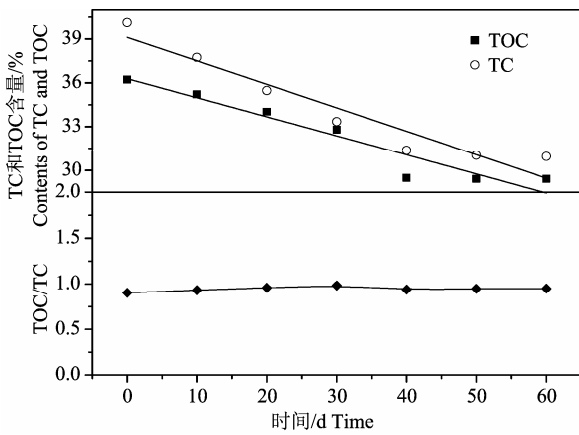


图1 NC的总碳和总有机碳变化的比较

Figure 1 The comparison of the changes between TC and TOC content in the NC composting

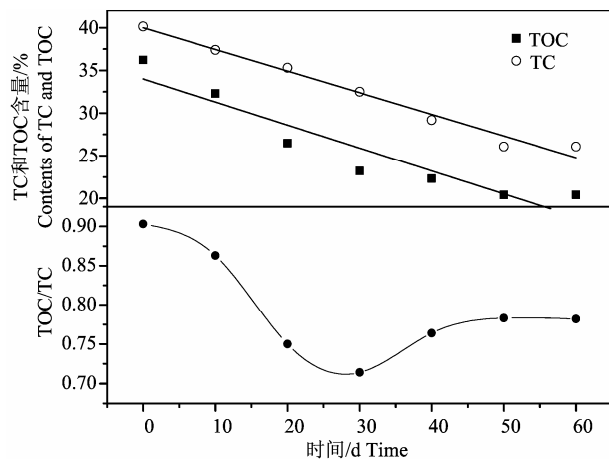


图2 VC总碳和总有机碳变化的比较

Figure 2 The comparison of the changes of between TC and TOC content in the VC composting

图2显示了VC的总有机碳含量变化趋势与总碳含量变化趋势基本相同,但总有机碳含量占总碳

含量百分比先降低后升高,表明堆制不同阶段中总有机碳含量变化与总碳含量变化有所差异。在0~30 d阶段,总有机碳占总碳含量百分比由90.3%下降到71.4%,是由于此阶段蚯蚓及相关微生物分解糖、有机酸等简单有机物,分解速度快,为快速分解阶段;30~60 d阶段总有机碳占总碳含量百分比由71.4%上升到78.2%,因为蚯蚓及相关微生物分解纤维素、木质素等复杂有机物,分解速度减缓,有机碳含量下降得慢,同时,伴随上述分解蚯蚓还有新的有机物质的合成。有研究证明^[25],有机质被蚯蚓和微生物降解的同时,还伴随着腐殖化过程,蚯蚓处理的牛粪物料中总腐植酸呈现先下降后升高的趋势,在培养20 d出现转折,20~60 d物料中总腐植酸含量逐渐升高。

表5 NC和VC全氮含量的变化
Table 5 The changes of TN contents in the NC and VC composting

堆制时间/d Composting time	NC堆制物 NC composting	VC堆制物 VC composting
0	18.03±0.17 ^{aA}	18.03±0.17 ^{aA}
10	17.41±0.08 ^{bA}	16.31±0.29 ^{bB}
20	17.24±0.30 ^{cA}	12.90±0.11 ^{cB}
30	16.21±0.30 ^{dA}	9.08±0.18 ^{dB}
40	15.26±0.20 ^{eA}	7.89±0.24 ^{eB}
50	15.21±0.27 ^{eA}	7.55±0.22 ^{fB}
60	15.14±0.17 ^{eA}	7.51±0.22 ^{fB}

2.2 牛粪蚯蚓堆制过程中养分含量的变化

2.2.1 全氮的变化 表5表明,NC和VC堆制物全氮含量在堆制过程中不断降低,0 d鲜牛粪全氮含量最高,约为18.03 g·kg⁻¹,VC堆制产物蚯蚓粪全氮含量最低,约为7.51 g·kg⁻¹。第10天后,NC和VC 2种堆制方式之间堆制物有机碳含量差异显著(P<0.05),NC和VC堆制物全氮含量的变化差异可能原因是在堆制初期(0~10 d),NC和VC均处于自然发酵阶段,会释放NH₃,2种堆制物均有氮流失,全氮含量下降。由于堆制物料pH逐渐降低到蚯蚓生命活动适宜水平,蚯蚓代谢活动逐渐增强,牛粪蚯蚓堆制物与牛粪自然堆制物相比,放线菌和真菌数量显著提高,放线菌和真菌是化能有机营养型微生物,它们以糖类碳水化合物作为碳源和能源,以有机氮和无机氮作为氮源,由于蚯蚓和微生物的协同作用,牛粪蚯蚓堆制物中有机质被分解利用得更快。此外,蚯蚓活动增加了堆制物中氧气含量,促进了硝化细菌增殖,利于硝化细菌的硝化作

用, 硝化作用过程中会产生 N_2O , 是重要的温室气体之一。

表 6 NC 和 VC 速效氮含量变化

Table 6 The changes of AN content in the NC and VC composting $mg \cdot kg^{-1}$

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	1170.00±5.35 ^{aA}	1170.00±5.35 ^{aA}
10	985.33±24.14 ^{bA}	1011.33±11.03 ^{bB}
20	822.67±15.33 ^{cA}	940.00±6.48 ^{cB}
30	714.00±16.99 ^{dA}	896.00±11.58 ^{dB}
40	582.67±14.88 ^{eA}	861.67±12.66 ^{eB}
50	523.00±10.98 ^{fA}	840.00±8.83 ^{fB}
60	518.33±11.61 ^{fA}	834.33±7.04 ^{fB}

表 7 NC 和 VC 全磷含量变化

Table 7 The changes of TP contents in the NC and VC composting $g \cdot kg^{-1}$

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	5.02±0.08 ^{eA}	5.02±0.08 ^{fA}
10	5.92±0.13 ^{dA}	5.81±0.12 ^{eA}
20	7.80±0.24 ^{cA}	8.01±0.20 ^{dA}
30	9.30±0.23 ^{bA}	9.52±0.15 ^{cA}
40	10.48±0.49 ^{aA}	10.81±0.18 ^{bA}
50	10.86±0.19 ^{aA}	11.21±0.22 ^{aA}
60	10.93±0.26 ^{aA}	11.25±0.15 ^{aA}

表 8 NC 和 VC 速效磷含量变化

Table 8 The changes of AP contents in the NC and VC composting $mg \cdot kg^{-1}$

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	2021.00±44.86 ^{fA}	2021.00±44.86 ^{fA}
10	2237.67±47.13 ^{eA}	2371.33±22.40 ^{eB}
20	2568.00±29.80 ^{dA}	2790.67±16.82 ^{dB}
30	2969.00±21.42 ^{cA}	3460.67±44.39 ^{cB}
40	3430.00±33.95 ^{bA}	4172.00±17.91 ^{bB}
50	3686.00±34.71 ^{aA}	4567.67±40.09 ^{aB}
60	3710.00±17.18 ^{aA}	4614.00±16.33 ^{aB}

2.2.2 速效氮含量的变化 表 6 显示了 NC 和 VC 的速效氮含量在堆制过程中差异显著性降低。第 10 天后, NC 和 VC 2 种堆制方式之间堆制物速效氮含量差异显著 ($P<0.05$) 且 VC 速效氮含量降幅小于 NC 速效氮含量降幅。速效氮中 NO_3^- 极易通过渗漏进入地下, 导致 2 种堆制物速效氮含量在堆制过程

中均有流失而下降。可是, 在 VC 堆制物中, 蚯蚓消化道内脲酶和蛋白酶促进有机质矿化, 生成更多速效氮, 从而使堆制物中速效氮含量高于 NC 堆制物中速效氮含量。

观察速效氮占全氮含量百分比变化, 发现 VC 速效氮占全氮含量的百分比在堆制过程中逐渐升高, 0 d 时速效氮约占全氮含量的 6.5%, 60 d 时速效氮含量约占全氮含量的 11.1%; NC 速效氮占全氮含量的百分比则逐渐降低, 0 d 时速效氮含量约占全氮含量的 6.5%, 60 d 时速效氮含量约占全氮含量的 3.4%, 表明蚯蚓在消解牛粪过程中促进了其他形态氮向速效氮的转化。

表 9 NC 和 VC 全钾含量变化

Table 9 The changes of TK contents in the NC and VC composting $g \cdot kg^{-1}$

堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	5.49±0.03 ^{aA}	5.49±0.03 ^{aA}
10	5.40±0.06 ^{bA}	5.40±0.06 ^{bA}
20	5.32±0.07 ^{cA}	5.22±0.13 ^{cA}
30	5.21±0.07 ^{dA}	5.01±0.08 ^{dB}
40	5.11±0.06 ^{eA}	4.97±0.23 ^{deB}
50	5.07±0.18 ^{efA}	4.93±0.17 ^{eB}
60	5.05±0.23 ^{fA}	4.91±0.14 ^{fB}

2.2.3 全磷含量的变化 方差分析结果表明 (表 7), NC 和 VC 的全磷含量在堆制过程差异显著性升高, 表明牛粪自然堆制处理、牛粪蚯蚓消解处理均显著增加了堆制物中全磷的含量 ($P<0.05$)。NC 和 VC 2 种堆制方式之间堆制物全磷含量差异不显著 ($P<0.05$), 说明牛粪自然堆制和牛粪蚯蚓堆制 2 种处理方式对堆制物全磷含量变化的影响机制相仿。堆制物中磷包括无机磷和有机磷, 无机磷易被固定, 淋溶损失小, 有机磷流动性大, 淋溶损失大。牛粪自然堆制发酵和牛粪蚯蚓堆制处理过程中由于有机质矿化作用, 一方面堆肥总重量减少, 另一方面促进了有机磷向无机磷转化, 降低了磷素损失, 进而总磷含量相对升高。

2.2.4 速效磷含量的变化 从表 8 中可见, NC 和 VC 的速效磷含量在堆制过程中差异显著性升高 ($P<0.05$), 第 10 天后 NC 和 VC 2 种堆制方式之间堆制物速效磷含量差异显著性 ($P<0.05$), NC 堆制物速效磷含量由 2021 $mg \cdot kg^{-1}$ 上升到 3710 $mg \cdot kg^{-1}$, 增幅为 1689 $mg \cdot kg^{-1}$; VC 堆制物速效磷含量由 2021 $mg \cdot kg^{-1}$ 上升到 4613 $mg \cdot kg^{-1}$, 增幅为 2592 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

这种差异的可能原因是在堆制过程中,有机质矿化作用释放速效磷,导致2种堆制方式中的堆制物速效磷含量均不断升高;由于蚯蚓的活动利于堆制物中相关微生物的增殖,蚯蚓和微生物协同作用促进堆制物有机质矿化。此外,蚯蚓消解有机质过程中会分泌有机酸,有机酸可将难溶性磷酸盐转变为可溶性速效磷^[26],因此VC堆制物中速效磷含量的增幅高于NC堆制物中速效磷含量的增幅。

表 10 NC 和 VC 堆制物速效钾含量变化

Table 10 The changes of AK contents in the NC and VC Composting $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
堆制时间/d Composting time	NC 堆制物 NC composting	VC 堆制物 VC composting
0	324.67±2.49 ^{aA}	324.67±2.49 ^{cdA}
10	319.67±10.34 ^{ba}	315.67±5.31 ^{ea}
20	303.67±6.34 ^{ca}	321.33±5.79 ^{da}
30	287.00±5.89 ^{da}	326.33±6.55 ^{cb}
40	273.33±6.02 ^{ea}	331.67±4.50 ^{bb}
50	272.33±4.92 ^{ea}	335.33±5.44 ^{abB}
60	270.67±3.68 ^{ea}	336.33±5.79 ^{ab}

比较速效磷占全磷含量的百分比在不同发酵阶段的变化,可以看到,0 d 时 VC 速效磷占全磷含量百分比为 40%, 10~40 d 阶段速效磷占全磷含量百分比有所降低, 50~60 d 阶段速效磷占全磷含量百分比升高到 41%, 各个阶段 VC 速效磷占全磷含量百分比变化很小。而 NC 在 0~40 d 阶段速效磷占全磷含量百分比由 40.2% 下降到 31.7%, 40~60 d 阶段速效磷含量占全磷含量百分比由 31.7% 上升到 34%, 其速效磷占全磷含量百分比在堆制结束时下降了 6%。表明 NC 堆制过程中速效磷含量增加速率低于其全磷含量增加速率, VC 牛粪相比 NC 堆制发酵, 可促进其他形态磷向速效磷转化。由于本试验在露天环境下开展, 雨水等自然因素引起速效磷流失而导致速效磷含量占全磷含量百分比的变化有待进一步研究。

2.2.5 全钾含量的变化 表 9 显示了 NC 和 VC 全钾含量在堆制过程中的变化情况。在 0~40 d 内, NC 全钾含量下降明显, 而 VC 全钾含量则在 0~30 d 内下降明显。NC 全钾含量由 $5.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $5.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 降幅为 $0.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; VC 全钾含量由 $5.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $4.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 降幅为 $0.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 这与柏彦超等^[27]的研究一致的。方差分析 ($P<0.05$) 显示第 30 天后 NC 和 VC 2 种堆制方式之间堆制物全钾含量差异显著, 但整个过程中 2 种堆制方式全钾含量变化

差别较小, 表明牛粪自然堆制发酵和蚯蚓消解牛粪对全钾含量变化的影响机制相似。

2.2.6 速效钾含量的变化 如表 10 所示, 方差分析显示 NC 速效钾含量呈差异显著性下降, VC 速效钾含量呈上呈差异显著性升趋势 ($P<0.05$)。第 30 天后 NC 和 VC 两种堆制方式之间堆制物速效钾含量差异显著 ($P<0.05$), 这与朱晓玲等^[24]的研究一致, 但与汪孙军^[28]的研究结果中速效钾的含量减少有所不同, 这可能是由于实验物料成分和处理条件不同所致。这种差异的可能原因是 NC 堆制物中部分结合态钾转变为速效钾, 但淋溶损失消耗的速效钾含量更多, 因此 NC 堆制物速效钾含量呈下降趋势; VC 堆制物中蚯蚓与相关微生物协同代谢活动产生的酸性物质促进了结合态钾转变为速效钾, 因此 VC 堆制物速效钾含量呈上升趋势。

3 结论

经过蚯蚓消解的堆制物即蚯蚓粪 pH、总碳、有机碳、全氮和全钾含量均低于传统的牛粪自然堆制物, 全磷、速效磷、速效氮和速效钾均高于牛粪自然堆制物。2 种堆制方式的对比结果表明, 牛粪蚯蚓堆制加快了堆制物矿化速率, 降低粪便中氮素逸出所导致的环境污染, 提高了堆制物速效养分含量。本文的牛粪蚯蚓堆制定位研究开展于 2015 年 4 月至 2015 年 5 月底, 试验消解对象是奶牛粪, 消解者是赤子爱胜蚓, 但不同季节的温度、湿度等气候条件变化以及试验消解对象和消解者的差异均可能对试验结果产生不同影响; 试验是在露天环境下开展的, 雨水等自然因素引起速效物质流失而导致速效物质含量占相应物质全量百分比的变化也须进一步完善。

参考文献:

- [1] 陈智远, 石东伟, 王恩学, 等. 农业废弃物资源化利用技术的应用进展[J]. 中国人口资源与环境, 2010, 20(12): 112-114.
- [2] 国辉, 袁红莉, 耿兵, 等. 牛粪便资源化利用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 5(36): 68-75.
- [3] 周世霞, 梅春升. 蚯蚓在现代化畜牧养殖业中的开发与应用前景[J]. 江西饲料, 2007(4): 5-7.
- [4] 邱江平. 蚯蚓在处理有机废弃物和生活污水上的应用[J]. 上海农学院学报, 2000, 18(1): 53-58.
- [5] 向前, 李得全. 蚯蚓的应用价值与饲养技术要点[J]. 河南农业科学, 2002(1): 35.
- [6] 陈泽光, 周颖. 蚯蚓在畜牧养殖业中的应用[J]. 中国牛业科学, 2009, 35(5): 35-38.
- [7] EDWARDS C A, NEUHAUSER E F. Earthworms in

- Waste and Environmental Management[M]. The Hague: SPB Academic Press, 1988: 392.
- [8] 侯吉聪, 乔艳云, 董仁杰. 不同温度下蚯蚓在生活垃圾中生长规律的研究[C]//第四届环境模拟与污染控制学术研讨会论文集. 2005.
- [9] 沈明星, 王海候, 沈晓萍, 等. 温度对蚯蚓处理牛粪能力的影响及其调控效果[J]. 江苏农业科学, 2008, 5(3): 263-265.
- [10] 王海候, 沈明星, 陆长婴, 等. 晚秋早冬季节覆盖保温措施对蚯蚓处理牛粪能力的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7): 173-175.
- [11] GUNADI B, CLIVE A, EDWARDS C A, et al. The influence of different moisture levels on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (savigny) in cattle and pig manure solids[J]. Soil Biol, 2003, 39: 19-24.
- [12] REINECKE A J, VENTER J M. Moisture preferences, growth and reproduction of the compost worm *Eisenia foetida* (Oligochaeta)[J]. Biol Fert Soil, 1987(3): 135-145.
- [13] NDEGWA P M, THOMPSON S A, DAS K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. Bioresource Technology, 2000, 71(1): 5-12.
- [14] AIRA F, DOMINGUEZ J. C to N ratio strongly affects population structure of *Eisenia foetida* in vermicomposting systems[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(s1): 127-131.
- [15] PIUS M N, DEGWA S A. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids[J]. Bioresource Technology, 2000, 75: 7-12.
- [16] 李辉信, 胡锋, 仓龙, 等. 蚯蚓堆制物对牛粪性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 588-593.
- [17] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 1983: 73.
- [18] 中华人民共和国农业部. NY/T1121.6-2006. 中华人民共和国农业行业标准-土壤有机质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] 中华人民共和国农业部. NY/T298-1995. 中华人民共和国农业行业标准-有机肥料全磷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [20] 中华人民共和国农业部. NY/T299-1995. 中华人民共和国农业行业标准-有机肥料全钾的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [21] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 140-208.
- [22] 中华人民共和国农业部. NY/T300-1995. 中华人民共和国农业行业标准-有机肥料速效磷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [23] 中华人民共和国农业部. NY/T301-1995. 中华人民共和国农业行业标准-有机肥料速效钾的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [24] 朱晓玲, 杨雪, 连宾. 用蚯蚓处理牛粪增加其养分含量的研究[J]. 微量元素与健康, 2012, 29(3): 1-3.
- [25] 郭鹏飞. 蚯蚓处理养牛场牛粪试验及腐植酸物质变化规律研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2014.
- [26] 赵海涛, 狄霖, 刘平, 等. 蚯蚓生物床工程处理对牛粪性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 255-259.
- [27] 柏彦超, 周雄飞, 等. 牛粪经蚯蚓消解前后理化性质的比较研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(10): 135-137.
- [28] 汪孙军. 蚯蚓对牛粪的转化作用及其产物的初步应用效果[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.