doi：10.11838/sfsc.1673-6257.18416

添加苹果渣对猪粪好氧堆肥理化性状的影响

陶　勇，湛含辉*，唐铄松

（中国矿业大学环境与测绘学院，江苏　徐州　221116）

摘　要：用猪粪等原料作堆肥底物，并分别添加质量分数为0%、5%、10%、20%的苹果渣以及1%的柠檬酸作添加剂，记作CK、AP1、AP2、AP3、N。采用自行设计的强制通风静态垛堆肥反应器，进行为期30 d的好氧混合堆肥。根据苹果渣与猪粪混合堆肥过程中各养分变化来研究苹果渣对堆肥效果的影响及其保氮效果，为猪粪有机肥的规模化生产提供理论支持，实现农业资源的可持续化。结果表明：各试验堆肥均达到无害化和腐熟化的要求；各处理全P和全K含量总体呈上升趋势，但添加20%的果渣处理不利于P含量的积累；苹果渣中的果酸可以降低堆肥的pH值，从而减少NH_4^+-N向氨气的转化，降低氮素损耗起到保氮效果；添加10%的苹果渣处理的全氮含量最高，保氮效果最好，添加5%的苹果渣处理对NH_4^+-N的积累最好；苹果渣作为猪粪好氧堆肥调理剂可以提高堆肥效果，实现农业资源的可持续化。

关键词：苹果渣；猪粪；好氧堆肥；养分变化；保氮效果

畜禽养殖业集约化和规模化的高速发展，我国的养殖场的数量迅速增加，其中养猪场的个数最多[1]。巨大的猪粪产量加上低的粪便利用率[2]，就会产生大量的污染物污染环境。畜禽粪便中含有大量的营养成分，2011年畜禽粪便的氮、磷产量为1 419.76万和247.98万t，其中猪粪便的氮、磷贡献率分别从1978年的16.40%和4.87%上升到2011年的28.15%和22.93%[3]，可见对猪粪的有效利用不仅会改善环境，而且猪粪作为有机肥其所含的大量养分被作物吸收利用，将会实现资源的可持续利用。

陕西省是全国范围内苹果生产和加工的主要大省，据陕西省统计局和陕西省果业管理局最新统计的数据显示，到2016年底，陕西省苹果栽种总面积已达72万hm^2，产量为1 100.78万t；甚至到2017年底，陕西省苹果产量达约1 120万t，是全球集中性成片种植及苹果产出量最大的区域[4]。随着苹果产量的急速增长，浓缩苹果汁加工业迅猛发展，苹果深加工带来的副产物苹果渣，俨然成为一个环境污染难题。中国每年大约500万t苹果用于生产苹果汁，约产生100多t苹果渣[5]。陕西省每年湿苹果渣的排放量就达60万t以上，数量惊人[6]，然而仅有30%左右的苹果渣回收利用，主要作为动物饲料和燃料使用，剩余70%左右的苹果渣被当做垃圾丢弃[7]，苹果渣极易腐烂并散发恶臭，污染环境[8]。

苹果渣中含有丰富的纤维素、矿物质、可溶性糖、有机酸等营养物质[9]，如果得不到合理利用，浪费资源的同时也会造成环境污染。目前对苹果渣的利用主要集中在生产牲畜饲料，由于果渣中所含的纤维素不易被牲畜消化吸收，而且生产中还要注意果渣的农药残留等问题[10]，所以用于饲料生产有一定局限性。近些年来不少学者利用苹果渣进行发酵生产酒精[11-12]、制取果胶[13-14]、提取膳食纤维[15-17]等。虽然经过深度研究和开发，取得了一定的研究成果，但未达到产业化生产要求，而且有些操作过程复杂，运行成本过高，不利于大范围的生产。

本研究用猪粪和小麦秸秆原料作堆肥底物，固体废弃物苹果渣作调理剂，对其混合堆肥过程中温度、pH值以及有机质等养分的变化进行系统研究，以期实现苹果渣和猪粪的资源化利用，提高堆肥品质、降低氮素的损失，为猪粪有机肥的规模化生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

养殖场猪粪、粉碎的小麦秸秆、苹果渣，试验

收稿日期：2018-10-21；**录用日期：**2019-01-24

基金项目：国家自然科学基金（51574238）。

作者简介：陶勇（1994-），男，安徽马鞍山人，在读研究生，研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail：18829352214@163.com。

通讯作者：湛含辉，E-mail：zhanhhh@263.net。

材料的初始性质见表 1。

表 1　堆肥物料的特性

原料	有机质（%）	pH 值	全 N（%）	全 P（%）	全 K（%）	硝态氮（g/kg）	铵态氮（g/kg）
猪粪	54	8.40	2.76	2.71	0.66	0.22	2.29
小麦秸秆	72	7.30	0.39	0.29	1.17	0.96	0.97
苹果渣	86	3.90	1.01	0.28	0.35	0.03	0.71

1.2　方法

1.2.1　堆肥试验方法

堆肥试验共设置 5 个处理：对照（CK），猪粪与小麦秸秆按质量比（鲜猪粪∶干秸秆）10.5∶1 混合，调节含水率在 65% 左右，控制堆肥总重为 25.6 kg 左右；其余 4 个处理分别为添加 5%、10%、20% 的苹果渣以及 1% 的柠檬酸处理，记为 AP1、AP2、AP3、N。混匀物料并将其有层次的堆放于试验箱的筛板上，堆制 30 d。

1.2.2　堆肥装置

堆肥采用自制的强制通风静态垛堆肥反应器（图 1）。

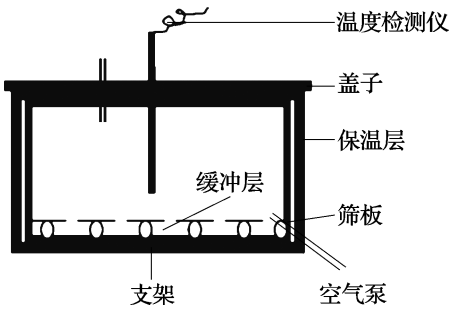

图 1　堆肥反应器示意图

反应器实际体积约为 90 L，箱外加装厚为 80 cm 的保温层，防止夜间温度过低使堆体散热。采用空气泵以 60 mL/min 的流量由筛板向上均匀充气，通风时间根据堆温调节，一般情况下每天上、下午各通风 30 min，当堆温超过 65℃时，通风时间增加 45 min，堆肥进入腐熟期后，停止通风。

1.3　采样及指标测定

1.3.1　堆肥采样

各处理分别于 0、6、11、16、23、30 d 采样，取样前先将堆肥箱盖子打开去水，然后迅速翻堆充分混合均匀再取样，并称取样品质量，样品总量控制在 500 g 左右。将其分为两部分处理，200 g 放入密封塑装袋，用于水浸提液提取及其它性质的测定；其余自然风干，经粉碎处理后，过 1 mm 筛存储备用。

1.3.2　温度和 pH 值测定

每日 9：00、15：00 采用 XMT616 智能 ID 温度计于堆体中部测温，同时测定环境温度；pH 值的测定采用雷磁 pHS-3C 型酸度测定仪（水样比 5∶1）。

1.3.3　全 N、全 P、全 K 的含量测定

全 N 的测定采用凯氏定氮仪；全 P 采用消煮法将堆肥内有机磷转变为无机磷，再用钒钼黄比色法进行测定；全 K 的含量可直接用火焰光度计测定。

1.3.4　有机质、硝态氮、铵态氮的测定

有机质的测定采用马弗炉燃烧法（550℃）；铵态氮和硝态氮的测定首先按土液比 1∶10 进行浸提，然后利用连续的流动分析仪测定。

2　结果与分析

2.1　不同处理堆肥过程中基本理化性质变化

2.1.1　温度、pH 值变化

本试验通过每天 9：00 和 15：00 同一时刻对添加不同含量苹果渣、柠檬酸的堆肥堆体及环境温度进行连续 30 d 的测温记录，求其平均值作当天的温度，制得各堆体温度的变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可知，各处理堆温都呈现先升高再降低，最后趋于稳定并接近外界温度的趋势，添加柠檬酸处理的堆体温度变化与对照处理基本一致，符合堆肥要经历的升温、高温、降温腐熟 3 个阶段。各处理堆温在 50℃以上均达到 7 d，均符合无害化处理的要求[18]。添加 20% 苹果渣处理在 12 ~ 15 d 有个明显升温降温的过程，有可能是当时环境下微生物活动更活跃，释放大量的热导致的，会影响氮素损失。

在 30 d 的堆肥期间，每隔一段时间取一次样进行 pH 值的测定，总共 6 次样每个样分 3 个平行进行测定，记录后取平均值制得各堆肥过程中 pH 值的变化趋势如图 3 所示。

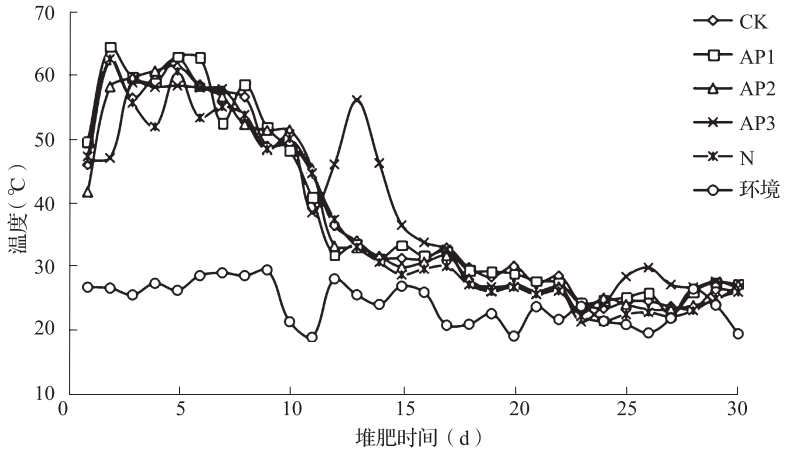

图 2　不同处理堆肥过程中温度变化

整个堆肥期间堆体 pH 值表现为先升高后降低再上升，各堆体 pH 值的范围均在 6.5 ~ 9.0 之间。堆肥初期含氮有机物所产生的氨使 pH 值升高，此后由于堆温降低，硝化细菌的活性增强，铵态氮在硝化作用下转变为硝态氮，同时有机物分解产生有机酸[19]，均使堆体 pH 值逐渐降低。随着堆肥的进行，有机酸挥发，pH 值又升高，与 Bernal 等[20]的研究一致，说明符合堆肥的 pH 值要求。从图 3 中可以看出，各处理堆肥过程中 pH 值普遍都比对照组略低，各处理的保氮效果也都比对照组好。

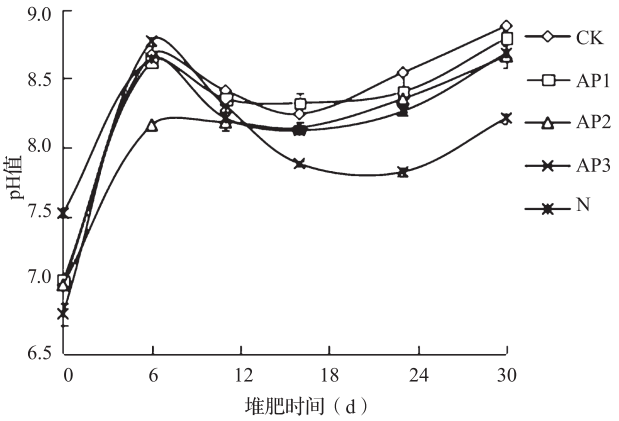

图 3　不同处理堆肥过程中 pH 变化

2.1.2　有机质含量变化

在 30 d 堆肥过程对每个处理各取得 6 次样品，每次样品分 3 组平行进行有机质含量的测定，求平均后制作的各处理堆肥过程中有机质的变化趋势如图 4 所示。

各堆肥处理中有机质含量均逐渐降低，并最终趋于稳定，与其他学者[21-22]均有一致结果。堆肥初期，由于苹果渣中含有较多的有机质，且苹果渣添加量越多，有机质含量越多，使得添加苹果渣的各处理堆肥有机质含量均高于对照。堆肥过程实际上是有机质的分解和腐殖化过程，16 d 之后易降解的有机质大部分被降解，堆肥基本腐熟。堆肥后期，添加苹果渣的堆肥还能继续降解腐殖化。

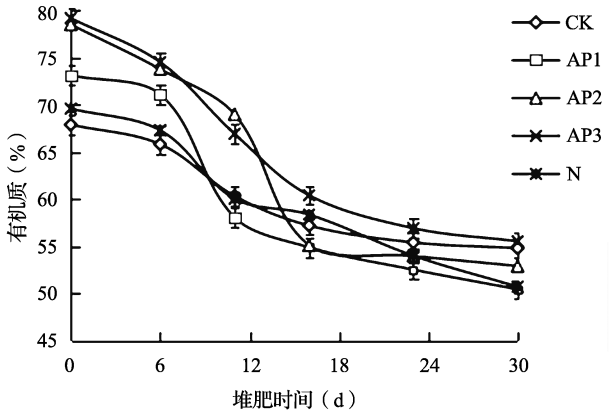

图 4　不同处理堆肥过程中有机质变化

2.2　不同处理堆肥过程中养分的变化

2.2.1　全 P 和全 K 含量变化

本次试验在 30 d 有氧堆肥过程中对每个处理各取了 6 次样，每次样分 3 个平行测定其中的全 P、全 K 的含量，记录取其平均值制得的趋势图见图 5 和图 6。

随着堆肥进程的深入，全 P 和全 K 总体呈上升趋势。由于堆肥过程中不存在 P 和 K 的挥发损失，引起 P 和 K 含量增加的原因主要是，微生物将堆肥中的有机质降解成 CO_2、NH_3 等挥发气体逸出，而使堆体重减少 1/3 ~ 1/2[23-24]，导致 P 和 K 相对含量的增加。在 30 d 堆制完成时，只有添加 20% 苹果渣处理的堆肥全 P 含量显著低于对照，达到最

低，说明添加 20% 苹果渣处理最终不利于 P 的积累，堆肥效果比其他处理效果差一点。原因在于，虽然初期微生物分解了部分果酸，但是由于 20% 的果渣所含的果酸过多，不足以完全利用，最终还是阻碍了有机质的分解进而影响了 P 的浓缩[21]。

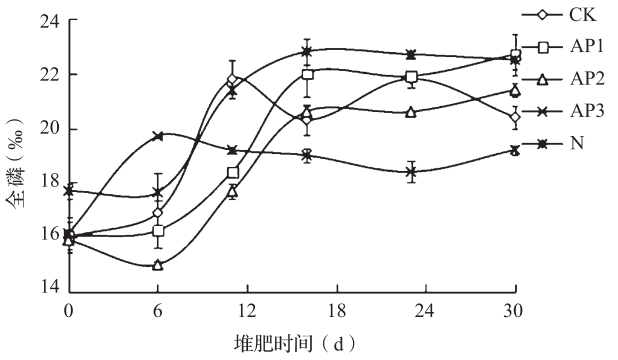

图 5　不同处理堆肥过程中全 P 含量变化

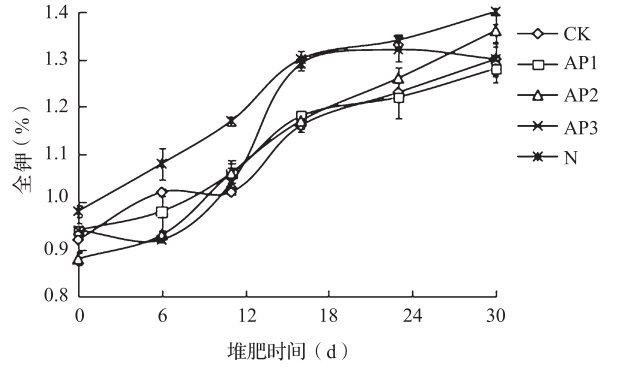

图 6　不同处理堆肥过程中全 K 含量变化

2.2.2　全 N 含量的变化

在 30 d 好氧堆肥过程中，对各处理采取的 6 次样品做 3 次平行进行全氮含量的测定，求平均值后制作的变化趋势如图 7 所示。

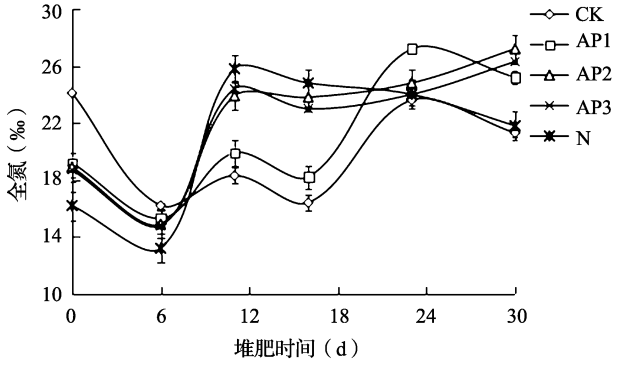

图 7　不同处理堆肥过程中全 N 含量变化

堆肥初期各处理全氮的含量都明显低于对照组，因为苹果渣的全氮含量低于猪粪的。各处理全氮含量先降低再升高，堆肥开始的 0 ~ 6 d 内，堆肥的升温期，在微生物的作用下，易分解的有机物矿化为铵态氮，在高温和碱性条件下形成氨气，导致氨气的大量挥发，造成氮素的损失，全氮的含量降低。进入高温期之后随着有机质的大量消耗，堆肥的总重量减小，全氮得到浓缩会有所增加[25]。堆肥结束时，各处理全氮含量均高于对照处理，说明添加苹果渣和柠檬酸均能起到保氮效果，而且苹果渣处理的全氮含量更高，添加 10% 的苹果渣处理的保氮效果最好。由堆肥温度变化（图 8）可以看出，添加 20% 的苹果渣处理在 12 ~ 15 d 有突然升温的变化，从而导致 NH_4^+–N 转化成 NH_3 释放增多，氮损失增加，全氮含量降低，所以保氮效果不及添加 10% 的。

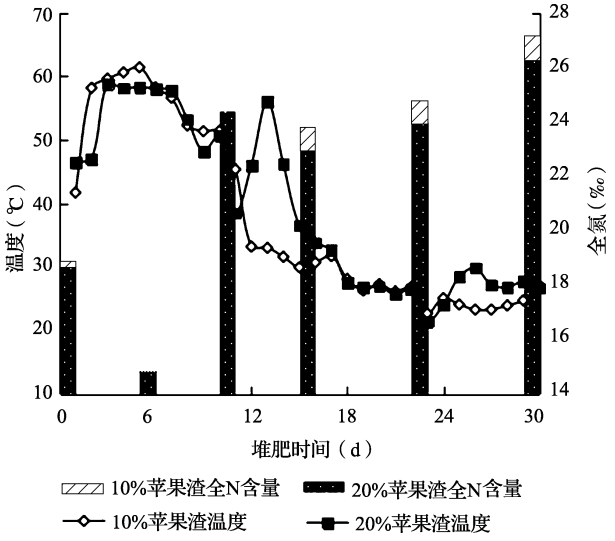

图 8　添加 10%、20% 苹果渣保氮效果比较

2.2.3　NH_4^+–N 含量的变化

对堆肥期间各处理采取的 6 次样每个样分 3 个平行进行 NH_4^+–N 含量的测定，取其平均值制作的变化趋势如图 9 所示。

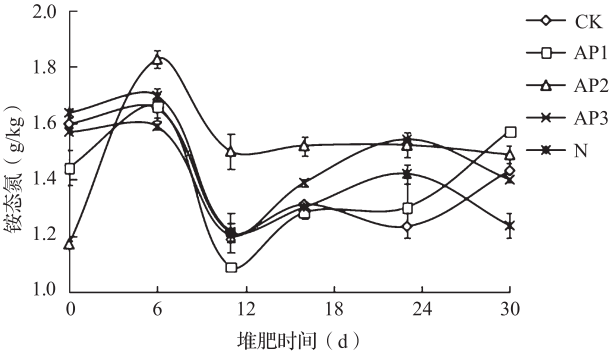

图 9　堆肥过程中铵态氮含量变化

堆肥初期有机氮矿化产生NH_4^+–N，导致NH_4^+–N的含量增加；进入高温期NH_3的大量挥发、NH_4^+–N向NO_3^-–N的转化和微生物的吸收利用均降低了NH_4^+–N的含量[26]；此后（12 ~ 18 d）由于NO_3^-–N对NH_4^+–N的影响[27]使得NH_4^+–N获得短暂积累；堆肥后期硝化作用使得NH_4^+–N含量减少。整个堆肥期间10%的苹果渣NH_4^+–N的含量明显高于其他处理，升温期不同处理的pH值和铵态氮含量关系如图10所示。

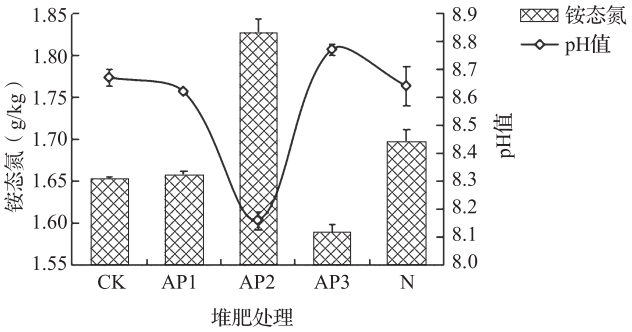

图10　堆肥过程升温期不同处理pH值与铵态氮含量关系

添加10%的苹果渣处理的pH值在升温期低于其他处理，铵态氮含量高于其他处理。那是因为苹果渣所含的果酸降低堆肥的pH值，降低了NH_4^+–N向NH_3的转化，减少氨气的释放，从而减少氮素的损失。30 d堆肥结束时，NH_4^+–N含量随着苹果渣添加量增加而降低，但显著高于柠檬酸处理。说明苹果渣处理对于铵态氮的保留好于柠檬酸处理，且5%的苹果渣添加量较好，降低了氮素的损失，起到了保氮效果。

2.2.4　NO_3^-–N含量的变化

对堆肥过程中各处理采集的6次样每个样分3个平行进行NO_3^-–N含量的测定，取其平均值制作的变化趋势如图11所示。

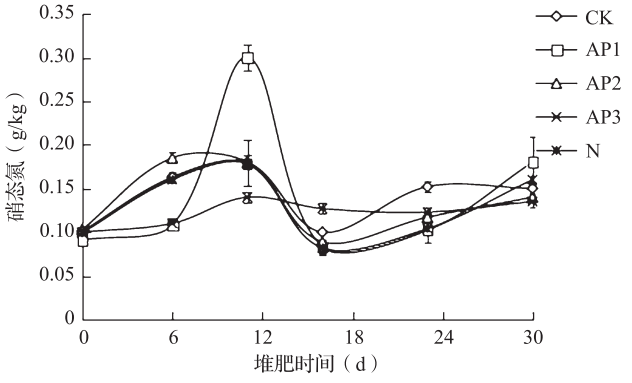

图11　不同处理堆肥过程中硝态氮含量变化

一般情况下堆肥中NO_3^-–N的含量较低，整体变化趋势为先升高后降低再升高。由于高温期硝化细菌的硝化作用受温度控制[28]，在堆肥初期，高温和碱性条件抑制了硝化细菌的作用，使得NO_3^-–N含量增加缓慢；堆肥的12 ~ 18 d内，NO_3^-–N迅速降低可能是由于堆温已基本接近外界温度，堆肥进入腐熟期，停止通风导致堆体内氧浓度过低，加上此时弱碱性的条件下，使得反硝化细菌大量繁殖，将NO_3^-–N还原成N_2O和N_2，除N_2之外，在不完全厌氧条件下也会产生NO和NO_2，从而导致NO_3^-–N迅速降低[27]。此后硝化作用增强，NO_3^-–N含量上升。整个堆肥期间5%的苹果渣对NO_3^-–N含量有明显提升，而且相同时期对应的NH_4^+–N的含量明显降低，有可能是降温腐熟期内添加5%的苹果渣硝化细菌的活性较高，促进硝化作用，抑制了氨化作用从而降低氮素的流失。其余各处理NO_3^-–N含量差异不明显。

3　结论

本研究结果表明，在堆肥中添加苹果渣后，各处理堆肥均达到无害化和腐熟化处理，说明废弃的苹果渣可以加入禽畜粪便中进行资源化利用；各处理堆肥全P和全K含量总体均呈上升趋势，但添加20%的果渣处理不利于P含量的积累；苹果渣中的果酸可以降低堆肥的pH值，减少NH_4^+–N向NH_3的转化，降低氮素的损失，起到保氮效果；添加10%的苹果渣的保氮效果最好，添加20%的苹果渣处理堆肥后期温度升高不利于氮素的积累从而降低保氮效果，添加5%的苹果渣对NO_3^-–N的影响最大，对NH_4^+–N的积累最好。用苹果渣作为猪粪好氧堆肥中的调理剂不仅可以做到物尽其用，避免浪费，而且减轻了对环境的污染，取得的经济、生态及社会效益显著，可以实现农业资源的可持续化。

参考文献：

[1]　孙良媛，刘涛，张乐. 中国规模化畜禽养殖的现状及其对生态环境的影响[J]. 华南农业大学学报（社会科学版），2016，（2）：23–30.

[2]　苏杨. 我国集约化畜禽养殖场污染治理障碍分析及对策[J]. 环境保护，2005，（4）：28–30.

[3]　朱建春，张增强，樊志民，等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报，2014，（3）：435–445.

[4] 李列琴. 苹果渣纤维素的氧化改性及其水凝胶的制备研究[D]. 杨凌：陕西科技大学，2018.
[5] 杨杰，沙立勋，辛力. 2012～2013年中国苹果市场调研分析[J]. 落叶果树，2013，45（3）：1-5.
[6] 李列琴，陈雪峰，刘宁，等. 苹果渣氧化纤维素的制备及表征[J]. 食品与发酵工业，2018，（2）：129-134.
[7] 东莎莎. 苹果渣的营养价值及综合利用[J]. 中国果菜，2017，37（2）：15-18.
[8] 曲昆生，董杰. 我国苹果深加工行业亟待解决的几个问题[J]. 山东食品发酵，2010，（1）：48-49.
[9] 国东. 利用苹果渣生产苹果醋的工艺研究[D]. 济南：山东轻工业学院，2012.
[10] 王来娣，邵丹. 苹果渣作为饲料资源的开发与利用[J]. 中国饲料，2012，（3）：43-45.
[11] 李静，李安民. 鲜苹果渣制备酒精的工艺研究[J]. 农产品加工，2009，（4）：60-63.
[12] 黄蓓蓓，员冬梅，员司雨. 苹果渣发酵制取酒精工艺研究[J]. 食品安全导刊，2015，（36）：173-176.
[13] 田玉霞，仇农学. 基于不同分子量级苹果果胶理化性质的研究[J]. 农产品加工（学刊），2009，（3）：153-156.
[14] 李洁，郭玉蓉，窦姣，等. 四种方法提取苹果肉渣果胶的流变学特性研究[J]. 食品工业科技，2015，36（12）：109-112.
[15] 王友强，牟建楼，马艳莉，等. 微波辅助法和酶法制备苹果渣膳食纤维特性研究[J]. 中国食品添加剂，2016，（9）：110-114.
[16] 孙艺. 绿色木霉发酵法制备苹果渣膳食纤维的工艺及其理化特性的研究[D]. 辽宁：沈阳农业大学，2017.
[17] 耿乙文，靳婧，李庆鹏，等. 不同产地苹果渣营养成分差异性分析研究与评价[J]. 核农学报，2016，30（2）：288-294.
[18] GB 7959—1987. 粪便无害化卫生标准[S].
[19] 邵淼，杨淑英，张增强，等. 不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报，2010，（5）：982-989.
[20] Bernal M P. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review[J]. Bioresource Technology，2009，100（22）：5444-5453.
[21] 毛晖，蔡函臻，季玉晓，等. 苹果渣添加量对猪粪好氧堆肥锌和铜形态的影响[J]. 安徽农业科学，2013，（29）：11676-11679.
[22] Steiner C. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. Journal of Environmental Quality，2010，39（4）：1236-1242.
[23] 兰时乐，曹杏芝，戴小阳，等. 鸡粪与油菜秸秆高温堆肥中营养元素变化的研究[J]. 农业环境保护，2009，（3）：564-569.
[24] 李杨，桓明辉，高晓梅，等. 杏鲍菇菌糠促进畜禽粪便发酵过程的研究[J]. 中国土壤与肥料，2014，（2）：97-100.
[25] 刘微，张津，李博文，等. 不同微生物菌剂对番茄秸秆好氧堆肥中氮磷钾元素的转化规律的影响[J]. 中国土壤与肥料，2014，（3）：88-92.
[26] 陈广银，王德汉，项钱彬. 蘑菇渣与落叶联合堆肥过程中养分变化的研究[J]. 农业环境科学学报，2006，25（5）：1347-1353.
[27] 林小凤，李国学，任丽梅，等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究[J]. 农业环境科学学报，2008，27（4）：1662-1666.
[28] 李荣华，张广杰，张增强，等. 添加木炭改善猪粪稻壳好氧堆肥工艺及质量[J]. 农业工程学报，2014，30（16）：230-238.

Effect of adding apple residue on physicochemical properties of swine feces aerobic compost

TAO Yong，ZHAN Han-hui*，TANG Shuo-song（School of Environment Science and Spatial Informatics，China University of Mining and Technology，Xuzhou Jiangsu 221116）

Abstract：30 days aerobic composting was conducted by home-made forced ventilation static pile composting reactor using raw materials such as pig manure as compost substrate，and apple residue with the proportion of 0%，5%，10%，20% respectively and 1% citric acid. The effects of apple residue on swine feces composting were studied according nutrients change during the composting process，in order to provide theoretical support for using swine feces as organic fertilizer and achieve sustainable utilization of agricultural resources. The results showed that the composts of all treatments had met the requirement of the innocuity and maturity by the Fecal Harmless Health Standard. The total P and K contents showed increasing gradually，but adding 20% of apple residue decreased the accumulation of P content. The fruit acid in the apple residue reduced the pH of the compost and reduced the conversion of NH_4^+-N to ammonia gas，thereby reduced nitrogen loss then maintained the nitrogen retention effect. The addition of 10% apple residue had the highest total nitrogen content and the best nitrogen retention effect，5% apple residue treatment had the greatest impact on the accumulation of NH_4^+-N. As the swine feces aerobic composting conditioner，apple pomace can improve the composting effect and realize the sustainable development of agricultural resources.

Key words：apple residue；swine feces；aerobic compost；nutrient change；nitrogen retention effect